

READECUACIÓN GEOMÉTRICA DE UNA  
ESTRUCTURA METÁLICA.

---



Autor: De la Canal Daniela Soledad.

Director: Dra. Pernich Adriana.

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL.

Ingeniería Civil.

Facultad de Ingeniería – Neuquén.

2020.

## RESUMEN.

---

Una facilidad de transporte y distribución de gas en operación y que presta servicio hace más de treinta y cinco años registra en el ducto desplazamientos del orden de su diámetro. Como se muestra en la figura R.1, esta línea de conducción cruza el cauce del río por medio de un sistema estructural compuesto por torres, un cable principal y péndolas. En función de las condiciones de emplazamiento de la estructura y la tecnología instalada se desarrolla una propuesta factible y confiable de readecuación geométrica para los desplazamientos registrados, y que además facilite futuros estadios de mantenimiento. La propuesta se simula en un software de elementos finitos donde se verifica que durante la recomposición geométrica las tensiones desarrolladas no sobrepasen las tensiones admisibles de cada sección.



*Figura R.1: Sistema estructural metálico objeto del Proyecto Integrador Profesional. – propia-*

## PALABRAS CLAVE.

---

Readecuación geométrica de una estructura metálica. Modelo de elementos finitos. Retesado de cables de acero. Análisis estático de tensiones.

## **ABSTRACT.**

---

A gas transportation and distribution facility in operation and that has been in service for more than thirty-five years, registers displacements of the order of its diameter in the pipeline. As shown in figure R.1, this pipeline crosses a riverbed by means of a structural system composed of towers, a main cable and hangers.

Based on the location conditions of the structure and the installed technology, a feasible and reliable proposal for geometric readjustment is developed for the registered movements, and that also facilitates future maintenance stages. The proposal is simulated in finite element software and it is verified that during the recomposition the developed stresses do not exceed the admissible ones of each section under analysis.

## **KEY WORDS.**

---

Geometric readjustment of a metallic structure. Finite element model. Retensioning of steel cables. Static stress analysis.

## **RECONOCIMIENTOS.**

---

Se agradece al Ing. Quidel Luis profesor de la casa por facilitar el equipamiento y su pericia durante la campaña de relevamiento geométrico.

Se agradece a la Dra. Pernich Adriana por la paciencia y su buena predisposición.

# ÍNDICE GENERAL.

---

1	CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Presentación del problema y motivación.....	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Organización del escrito.....	3
1.4	Alcance del trabajo final. ....	4
2	CAPÍTULO: ANTECEDENTES.....	6
2.1	Introducción. ....	6
2.2	Planos de la estructura.....	6
2.3	Informe de relevamiento geométrico in situ.....	19
2.4	Ensayos dinámicos en péndolas. ....	22
2.5	Conclusión.....	23
3	CAPÍTULO: PROPUESTA DE READECUACIÓN GEOMÉTRICA. ....	24
3.1	Introducción. ....	24
3.2	Tecnología actual de la estructura. ....	24
3.3	Descripción de la propuesta ....	25
3.4	Conclusión.....	29
4	CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y ANÁLISIS TEÓRICO DE CABLES.....	31
4.1	Introducción. ....	31
4.2	Caracterización de elementos estructurales.....	31
4.3	Modelo teórico del cable. ....	34
4.4	Conclusión.....	45
5	CAPÍTULO: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – MEF. ....	46
5.1	Introducción. ....	46
5.2	Mallado de la geometría.....	47
5.3	Elementos.....	48
5.4	Secciones.....	54
5.5	Materiales.....	54

5.6	Condiciones de borde.....	56
5.7	Condiciones iniciales.....	57
5.8	Cargas.....	58
5.9	Resultados.....	58
5.10	Conclusión.....	64
6	CAPÍTULO: MODELADO DE LA PROPUESTA DE READECUACIÓN GEOMÉTRICA.....	65
6.1	Introducción.....	65
6.2	Variable por modelar.....	66
6.3	Resultados y control de parámetros.....	67
6.4	Precisión de la propuesta de readecuación geométrica.....	75
6.5	Conclusión.....	78
7	CAPÍTULO: CÁLCULO Y COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS Y MODOS DE VIBRACIÓN.....	79
7.1	Introducción.....	79
7.2	Cálculo de frecuencias de la estructura en su condición actual y pos readecuación geométrica.....	79
7.3	Modos de vibración de la estructura previo a la ejecución de la readecuación geométrica.....	80
7.4	Modos de vibración de la estructura luego de la readecuación geométrica.....	80
7.5	Conclusión.....	80
8	CAPÍTULO: CONCLUSIONES.....	81
8.1	Conclusión.....	81
8.2	Análisis complementarios.....	82
8.3	Optimización de la propuesta.....	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	84
	ANEXOS.....	86

# 1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN.

---

## 1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y MOTIVACIÓN.

En una facilidad de transporte y distribución de gas se detectan desplazamientos del orden del diámetro de la línea de conducción. En dos oportunidades se realizaron mediciones de posición y en la última campaña se registraron desplazamientos descendentes de 0,65m en el cable principal y 0,63m en el ducto.

El sistema en estudio y objeto del proyecto integrador profesional se compone por una estructura sostén que resiste el cruce aéreo de un ducto sobre el cauce del río. Sobre el extremo superior de cada torre metálica ubicadas una en cada margen, se vincula el cable principal, que por medio de veintisiete cables secundarios y equidistantes (veinticinco entre torres y uno a continuación de cada torre) sostiene verticalmente un gasoducto de 24" (0,60m) de diámetro. De los brazos laterales de las torres se vinculan cables de viento que arriostran el gasoducto lateralmente. En las figuras R.1, 1.1 y 1.2 se muestran imágenes del sistema estructural descrito.



*Figura 1.1: Sistema estructural en estudio. –propia-*

La estructura posee más de treinta y cinco años en operación y servicio. A lo largo de esta instancia ha sido administrada por al menos tres compañías distintas. El ducto se corresponde con una línea de transporte primaria y el emplazamiento se encuentra en cercanías a zonas que hoy están pobladas. La documentación existente es escasa y al

momento de la detección de los desplazamientos y comienzo de este proyecto solo se cuenta con planos descriptivos del montaje.

El sistema se encuentra expuesto principalmente a variaciones de temperatura de gran magnitud, acción atmosférica, acción del viento y sus combinaciones.



*Figura 1.2: Sistema estructural en estudio. –propia-*

En las campañas de medición de posición también se realizaron estudios dinámicos e inspección visual. De esta última se observó que el ducto posee señales de deterioro exterior coincidentes con el avance de la acción electroquímica del entorno. El tipo de tecnología instalada en la estructura no permite efectuar mantenimientos correctivos o preventivos de los cables, de manera tal de poder corregir los desplazamientos. Tampoco se detectan válvulas, derivaciones ni trampas en cercanía al ducto, las que pudieran facilitar la ejecución de ensayos no destructivos y/o mantenimiento sobre éste. No se evidencio mantenimiento ni se hallaron documentos con registro de éste.

La motivación del trabajo final se fundamenta en el hecho de proveer una solución práctica y factible de corrección, proponiendo además tecnología que facilite futuros estadios de mantenimiento sobre la estructura, la cual evidencia cierto grado de deterioro pero que en contrapartida brinda un servicio de veinticuatro horas /siete días a la semana desde hace más de treinta y cinco años. Específicamente el proyecto concibe el desarrollo de una propuesta de reacondicionamiento geométrico, que permita corregir en la medida de lo posible, los desplazamientos registrados.



## **1.2 OBJETIVO.**

El objetivo principal del trabajo es confeccionar un modelo de elementos finitos que reproduzca fielmente la propuesta de readecuación geométrica de la estructura metálica donde el foco se centra en el ducto, que mediante un cruce aéreo atraviesa un cauce y que actualmente se encuentra en operación.

Para lograr satisfactoriamente el objetivo principal es necesario garantizar previamente los siguientes pasos que se irán enlazando durante el desarrollo de los capítulos: seleccionar el valor de tensión admisible del ducto/unión soldada, definir los parámetros de la propuesta de readecuación geométrica a simular y la secuencia del proceso, calcular el valor de tensión existente en el cable principal y péndolas, confeccionar y calibrar el modelo de elementos finitos que luego modelará la propuesta de readecuación, una vez calibrado el modelo simular los parámetros de readecuación durante el proceso y verificar que las tensiones desarrolladas en el ducto/unión soldada durante cada secuencia del retesado de cables no supere el valor admisible.

## **1.3 ORGANIZACIÓN DEL ESCRITO.**

*Capítulo 1: Introducción.* Se enfoca en presentar la singularidad de la situación, la motivación, objetivo, alcances e información general donde se describe el qué, cómo y para qué del Proyecto Integrador Profesional.

*Capítulo 2: Antecedentes.* Presenta y analiza la información existente al inicio del desarrollo del proyecto. Contiene información gráfica que describe desde distintos enfoques la estructura y sus elementos, también incluye los análisis y resultados de mediciones geométricas y dinámicas.

*Capítulo 3: Propuesta de readecuación geométrica.* Describe el tipo de tecnología instalada actualmente en la estructura y el motivo por el cual ésta no facilita la ejecución de correcciones ni mantenimiento. Luego se indica la propuesta del trabajo, donde se presenta la tecnología a incorporar, la cual favorece la corrección y posterior mantenimiento. Una vez descrita la tecnología a incorporar se explica cómo se prevé ejecutar la readecuación geométrica del gasoducto y los parámetros de este proceso que posteriormente se simulan y controlan mediante el modelo de elementos finitos.

*Capítulo 4: Caracterización de elementos estructurales y análisis teórico de cables.* Inicialmente se indica la obtención de los datos faltantes y necesarios para completar la caracterización de los elementos y materiales que conforman el modelo. A continuación,

se realiza un análisis teórico con base en la estática, donde se calculan tensión y posición de los cables, que luego serán comparadas con los resultados obtenidos en las campañas de inspección; las tensiones teóricas con las registradas en los ensayos dinámicos y las posiciones teóricas con las posiciones registradas de las mediciones in situ.

*Capítulo 5: Modelo de Elementos Finitos (MEF).* Se describen los hitos y consideraciones especiales necesarias para la confección del modelo; mallado de geometría, tipo de elementos y formulación, incorporación de secciones, incorporación de materiales, condiciones de borde, condiciones iniciales y asignación de cargas. Luego se analizan los resultados obtenidos, se comparan con los resultados de ensayos y cálculos teóricos de manera tal de verificar la calibración del modelo.

*Capítulo 6: Modelado de la propuesta de readecuación geométrica.* Partiendo del estado actual de desplazamientos registrado en la estructura se simula la ejecución del procedimiento de retesado en la malla de elementos finitos. Se verifican los resultados de los esfuerzos obtenidos y se completan los datos de la secuencia para una correcta y completa descripción de las etapas de readecuación geométrica. Es el capítulo más importante del PIP, aquí se alcanza el objetivo principal.

*Capítulo 7: Cálculo y comparación de frecuencias y modos de vibración.* Haciendo uso del modelo de elementos finitos, se calculan y comparan frecuencia y modo de vibración de la estructura en la condición actual y en la condición final luego de la recomposición geométrica.

*Capítulo 8: Conclusiones.* Se evalúa el grado de satisfacción con el cumplimiento del objetivo y se enumeran los análisis no alcanzados por este documento, los cuales podrían considerarse como futuras líneas de trabajo.

*Anexos:* Se incluyen todas las figuras que por motivos de relación de aspecto es necesario colocarlas en páginas con orientación horizontal.

#### **1.4 ALCANCE DEL TRABAJO FINAL.**

Del análisis de información relevada en las campañas de inspección se concluye que:

- Tormentas de viento han solicitado a la estructura, las cuales mediante vórtices y efectos dinámicos han provocado abollamientos localizados en algunos sectores del ducto.
- Durante gran parte del servicio y hasta la construcción de cercos perimetrales en los extremos de cada margen, civiles han hecho uso indebido del ducto

provocando deterioro localizado atribuido a impactos de rocas y descensos en “zona de trampolín” hacia el cauce.

- Cíclicamente la estructura es sometida a variaciones de temperatura de magnitud importante. Durante la inspección no se observó la presencia de ningún dispositivo que cumpla el objetivo de disipar la elongación del ducto.
- Los cables de viento que tienen por objetivo el arriostamiento lateral del ducto funcionan ante excitaciones dinámicas que lo desplacen lateralmente, en las campañas de inspección algunos de estos cables se encontraban enterrados bajo un volumen de tierra lo que impidió efectuar mediciones y por lo tanto no serán considerados.

La propuesta de readecuación y el modelo utilizado para la simulación no consideran estas deformaciones específicas, localizadas y de difícil determinación y evaluación. Se asume que con el cierre perimetral el acceso al ducto queda restringido. Respecto de los efectos dinámicos provocados por el viento, el tratamiento para considerarlo ha de ser laborioso y hasta quizá implique ensayos en túnel de viento lo cual excede los alcances del presente proyecto. El efecto de la variación de temperatura también ha de ser una sollicitación que requiere un análisis más exhaustivo y específico, lo cual también excede el alcance del proyecto. En conclusión, no se consideran efectos térmicos, dinámicos ni sus combinaciones.

En base a lo anteriormente expuesto se indica que el análisis de sollicitaciones a considerar en la propuesta de readecuación y su modelado se enfoca pura y exclusivamente en cargas gravitatorias cuya determinación es directa, una vez caracterizadas las secciones y los materiales.

El trabajo desarrolla una propuesta de mantenimiento correctivo y propone la metodología de ejecución del mantenimiento preventivo sobre una estructura preexistente, que fue diseñada y calculada bajo estándares y normativas vigentes en la época de construcción, la cual a la fecha no registra fallas ni colapso. Por lo tanto, la línea de trabajo adoptada será continuar con el espíritu de la normativa al momento de la concepción y considerar factores de seguridad que fabricantes recomienden. El análisis tensional se enfoca en los cables, el ducto y las uniones soldadas, y en todos los casos se hace una revisión de la normativa afín a cada especialidad.

El software utilizado para modelar es Abaqus 6.9, del cual la Facultad de Ingeniería cuenta con licencia vigente.

## 2 CAPÍTULO: ANTECEDENTES.

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN.

El objetivo del capítulo es describir y analizar los registros y documentos que se utilizaron como base de partida para el desarrollo del presente trabajo.

La documentación se conforma por: planos de la estructura, informe de relevamiento geométrico in situ y ensayos dinámicos en péndolas. Los planos son del tipo descriptivo y no incluyen memoria de cálculo de ninguno de sus componentes.

### 2.2 PLANOS DE LA ESTRUCTURA.

La documentación gráfica que se analizó consiste en planos del tipo aprobado para construcción (APC) y conforme a obra (CAO). Se extraen geometría, elementos estructurales y secciones tipo, uniones y vinculación externa. En base a esta información es que posteriormente se confecciona la malla del modelo de elementos finitos (MEF). A continuación, se indica y clasifica la información de estos documentos que se ha utilizado.

#### 2.2.1 Geometría y sistema de referencia.

Inicialmente se procede con la discretización de la estructura representada en los planos, para esto se genera una red de puntos coordenados y referenciados a un sistema de ejes  $x,y,z$  global, que se mantiene durante todo el desarrollo. La terna utilizada se muestra en la figura 2.1 y el origen  $(0,0,0)$  se ubica 2,60m por debajo del anclaje extremo A.

El *eje x* coincide con el eje principal del ducto y el sentido de incremento en progresiva es desde el anclaje del extremo A hacia el anclaje B, el *eje z* se desarrolla en dirección de la acción de la gravedad y el *eje y* se despliega coincidente con la dirección del cauce.

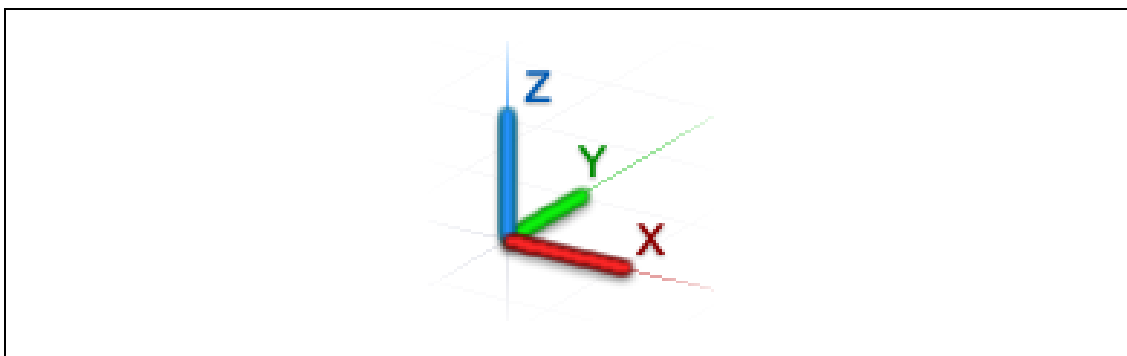


Figura 2.1: Sistema de ejes adoptado, según regla de mano derecha.

Una vez generada la red de puntos, estos se agrupan en segmentos según el elemento estructural que describen. Para una correcta visualización de las dimensiones del sistema estructural, a continuación, en figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se representan los distintos elementos estructurales conforme las distintas proyecciones.

En la figura 2.2 se observa la extensión total de la estructura según eje x, se registra una longitud total  $L_x=334,79m$  entre anclajes extremos A y B.

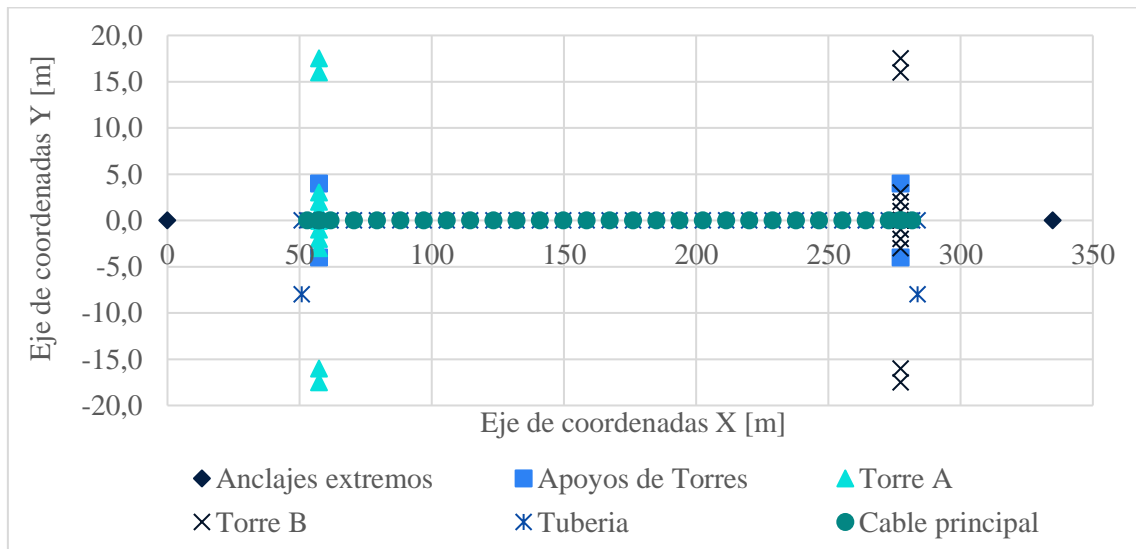


Figura 2.2: Proyección de la distribución de coordenadas en el plano x-y (horizontal).

En la figura 2.3 se muestra la extensión total de la estructura según eje z, se registra una altura total de la estructura  $L_z=26,64m$ , correspondiente con el extremo superior de las torres. En adelante se considera nivel horizontal del eje del ducto (sin desplazamientos, posición de diseño) la cota  $z=6,488m$ , valor al cual tiende la propuesta de readecuación.

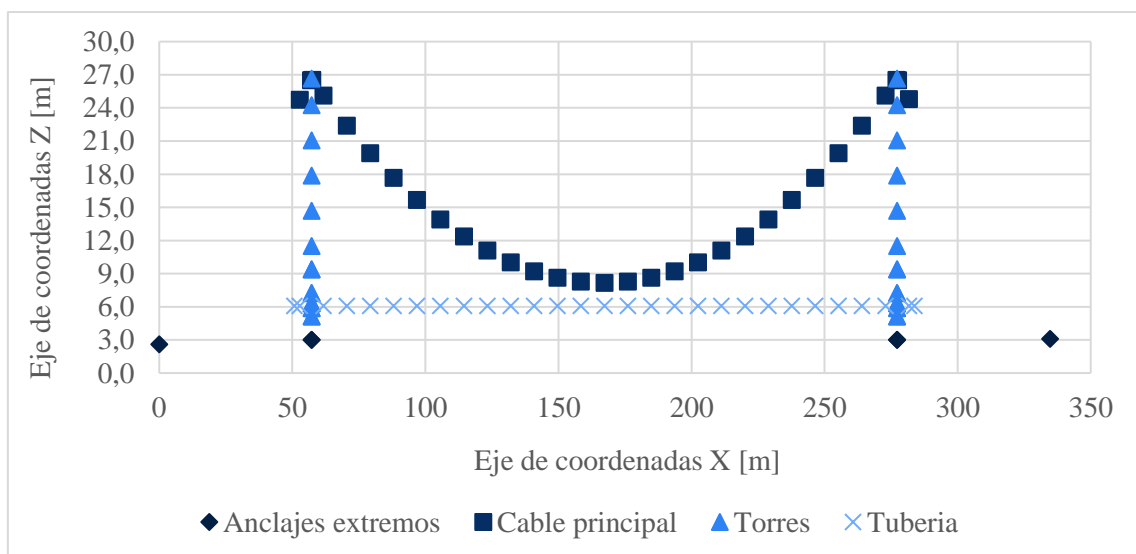


Figura 2.3: Proyección de la distribución de coordenadas en el plano x-z (vertical).

La figura 2.4 muestra la distribución de la estructura según eje y, se registra una extensión total  $L_y=35,0\text{m}$  correspondiente con el ancho de cada torre.

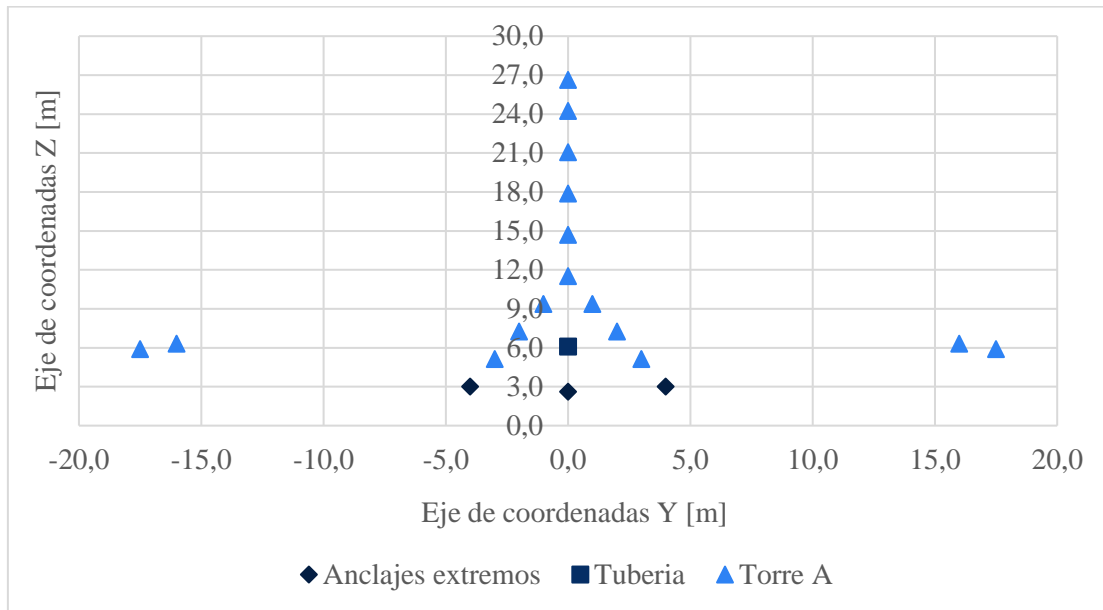


Figura 2.4: Proyección de la distribución de coordenadas en el plano y-z (vertical).

A continuación, y en las figuras 2.5 y 2.6 se muestra el sistema estructural completo y dispuesto en el espacio según los ejes globales de la figura 2.1. Se incluyen estas imágenes con el objeto de caracterizar espacialmente la estructura siendo extensa en longitud ( $L_{x\text{máx}}=334,79\text{m}$ ), de ancho ( $L_{y\text{máx}}=35,0\text{m}$ ) y altura ( $L_{z\text{máx}}=26,64\text{m}$ ). Presenta simetría respecto de los planos xz (posición  $L_y=0$ ) e yz (posición  $x = L_{x\text{máx}} / 2$ ).

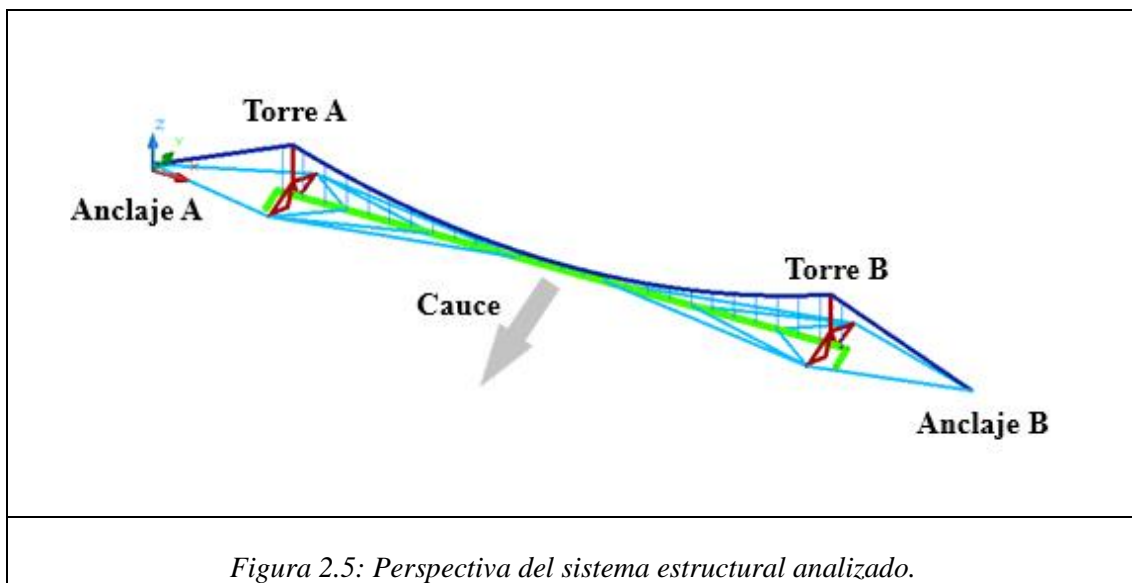
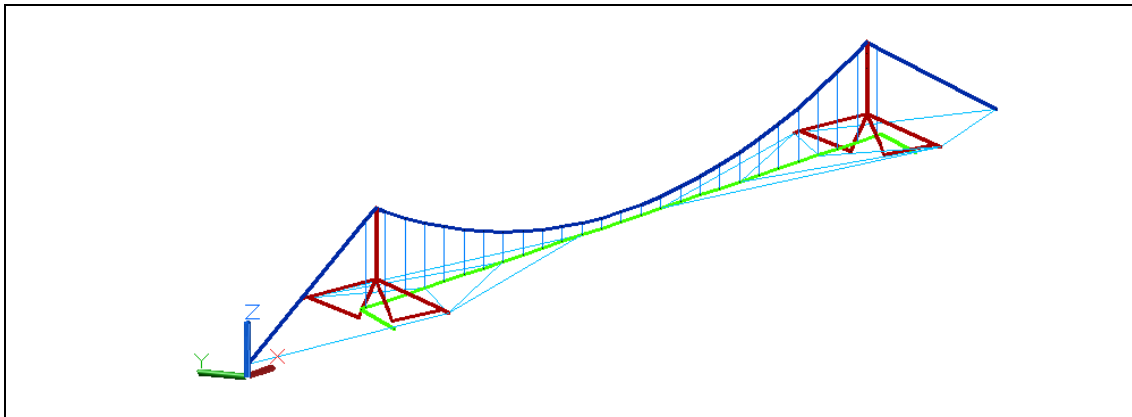


Figura 2.5: Perspectiva del sistema estructural analizado.



*Figura 2.6: Perspectiva del sistema estructural analizado.*

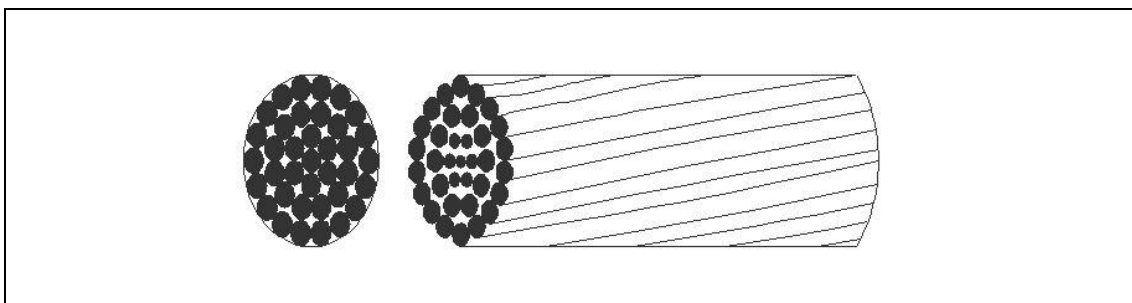
De esta manera queda definida la geometría espacial del sistema sobre la cual posteriormente se confecciona la malla de elementos finitos. También se distingue cromáticamente cada uno de los elementos estructurales que la componen, los cuales serán detallados a continuación.

## **2.2.2 Elementos estructurales y Secciones.**

Se indica y describe cada elemento estructural que compone el sistema en estudio.

### **2.2.2.1 Cable principal.**

Comúnmente llamado torón estructural (en las figuras 2.5 y 2.6 se indica con color azul), es el elemento tensor de mayor diámetro, se compone de tres tramos: el primero desde el anclaje extremo A hasta el punto más alto de la torre A, el segundo comprende el tramo ubicado entre ambas torres A-B y el tercero se extiende desde el extremo superior de la torre B hasta el anclaje extremo B. La figura 2.7 [extracción de 1] muestra la sección típica del cable principal, el mismo se conforma por una serie de alambres torcidos en forma helicoidal durante todo el tramo.



*Figura 2.7: Sección típica del cable principal. -De [1]-.*

En la tabla 2.1 se muestran los parámetros del cable principal indicados en la documentación gráfica; diámetro nominal y CMR. Donde CMR se corresponde con la

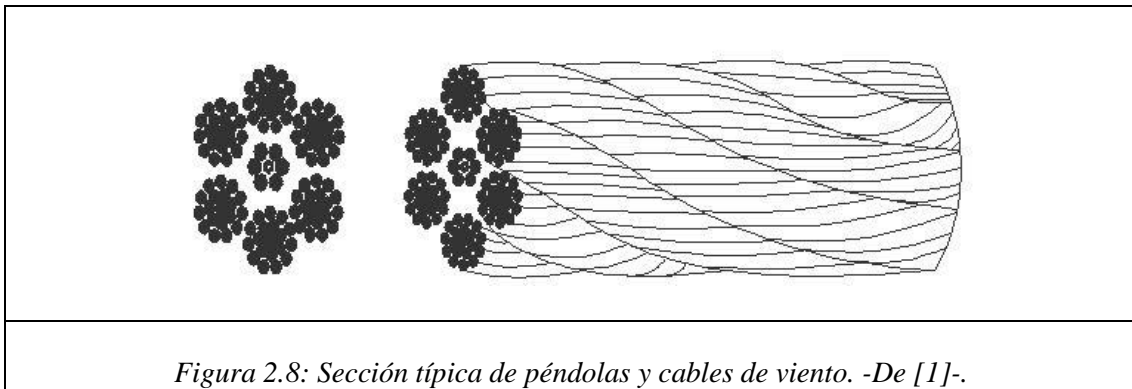
carga mínima de rotura y es el valor especificado del ensayo de tracción pura (por sus siglas en ingles también denominado MBS: minimun breaking strength).

Diámetro Nominal	CMR
[pulg]	[Tn]
2	245
[m]	[N]
0,0508	2401000

Tabla 2.1: Información del cable principal registrada en planos.

#### 2.2.2.2 Cables secundarios; péndolas y cables de viento.

Comúnmente denominado cable estructural (en las figuras 2.5 y 2.6 se indican con color celeste); son los elementos tensores doblemente articulados que sostienen el ducto verticalmente y que también lo arriostran lateralmente vinculándolo con las botavaras de las torres (brazos). La figura 2.8 [extracción de 1] muestra la sección típica del cable secundario; se conforma por seis torones trenzados en sentido helicoidal alrededor de un torón central y a su vez, cada torón está estructurado con alambres, también torcidos en forma helicoidal.



En las tablas 2.2 y 2.3 se presentan los valores de los cables secundarios indicados en la documentación gráfica; diámetros nominales y CMR (carga mínima de rotura).

Diámetro Nominal	CMR
[pulg]	[Tn]
44048	18
[m]	[N]
0,0158	176400

Tabla 2.2: Información de péndolas registrada en planos.

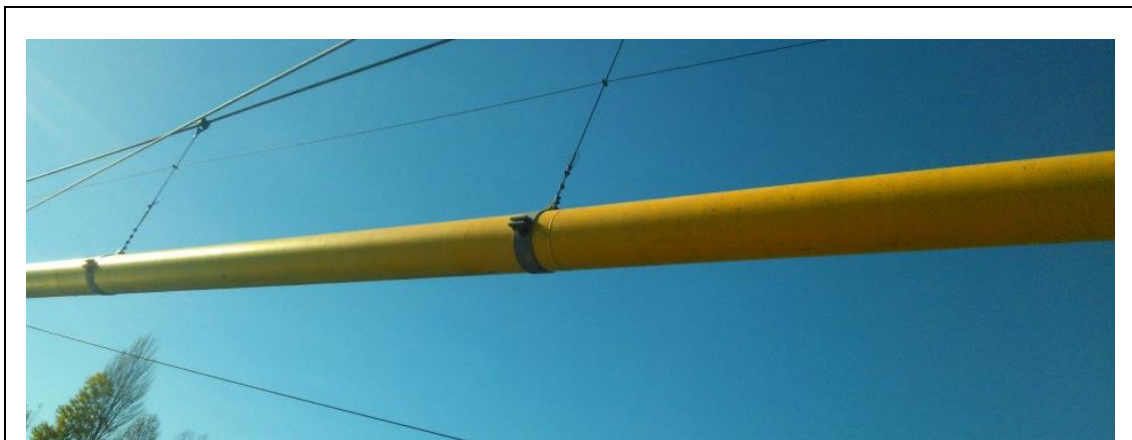


Nombre	Diámetro Nominal
T1	[pulg]
	5/8"
T2	[pulg]
	3/4"
T3	[pulg]
	7/8"
T4	[pulg]
	1"

*Tabla 2.3: Información de cables de viento registrada en planos.*

### 2.2.2.3 Ducto.

Elemento conformado por tramos de cañería de acero (sin costura) soldados, de gran rigidez individual pero que en conjunto incrementan considerablemente la flexibilidad de la línea (en las figuras 2.5 y 2.6 se indica con color verde). Es importante destacar que los tramos soldados que conforman el ducto no son de igual longitud, de hecho, en las campañas de inspección se observaron tramos de diversa longitud.



*Figura 2.9: Sección típica del ducto. –propia–*

Dentro del sistema la tubería es el elemento con mayor susceptibilidad a efectos de flexión. El ducto se considera en toda su extensión como un elemento estructural de sección circular uniforme, como se muestra en la figura 2.9.

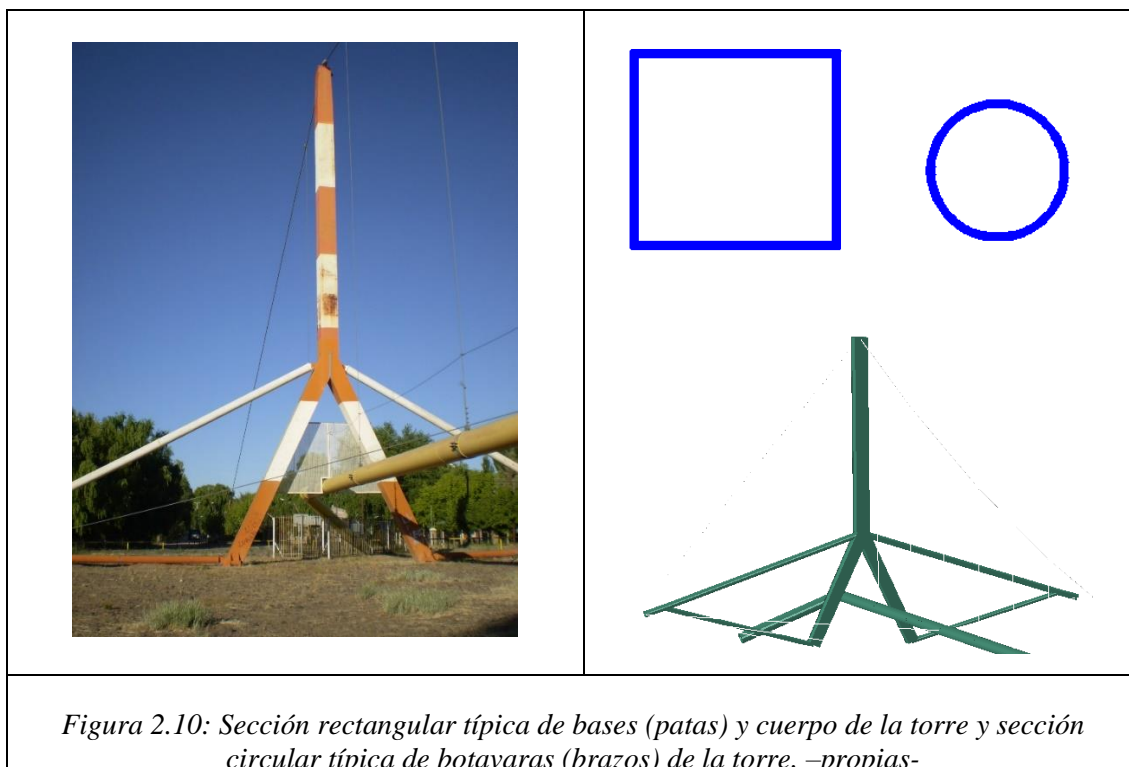
A continuación, y en la tabla 2.4 se indican los valores hallados en planos correspondientes al ducto.

Diámetro	Espesor
[pulg]	[mm]
24	7,75
[m]	[m]
0,6096	0,00775

Tabla 2.4: Información del ducto registrada en planos.

#### 2.2.2.4 Torres.

Las torres (en las figuras 2.5 y 2.6 se indican con color rojo) se constituyen interiormente por reticulados de perfiles soldados que conforman la estructura interna que exteriormente se reviste por una sección rectangular de chapas metálicas de grosor considerable. De esta manera se obtiene una estructura esbelta y liviana que asegura la resistencia necesaria para sostener el cable principal. Sobre los extremos de ambas torres, particularmente en la punta de las botavaras se localiza el sistema de sujeción de los cables de viento. Estas botavaras se componen de perfiles metálicos de sección circular.



En la figura 2.10 se muestra una imagen de la torre y se indican las secciones equivalentes consideradas para su representación. Para el desarrollo del modelo se asume la siguiente simplificación; la sección rectangular que se considera (como representación del cuerpo y base de la torre) es de un espesor tal que la rigidez de esta equivale a la rigidez del conjunto perfiles reticulados + chapa de recubrimiento. Es decir, se modificó el espesor

de la sección rectangular para representar la rigidez del conjunto reticulado + chapa de recubrimiento, de esta manera se simplifica la discretización y el mallado de la estructura. Las patas y el cuerpo central de cada torre se consideran constituidos por secciones rectangulares equivalentes y las botavara superior e inferior por secciones circulares. En la tabla 2.5 se indica la información correspondiente a las secciones consideradas.

	Diámetro	Ancho	Alto	Espesor
	[m]	[m]	[m]	[m]
Torre 1 – base/pata	-	0,6188	0,6518	0,008
Torre 2 – base/pata	-	0,6563	0,6594	0,008
Torre 3 – base/pata	-	0,6938	0,6671	0,008
Torre 4 – base/pata	-	0,7313	0,6748	0,008
Torre - cuerpo	-	0,75	0,75	0,008
botavara/brazo superior	0,3556	-	-	0,0079
botavara/brazo inferior	0,273	-	-	0,0078

*Tabla 2.5: Secciones de bases, cuerpo y botavaras de las Torres.*

### 2.2.3 Uniones.

El sistema estructural registra distintos tipos y dispositivos de unión entre los elementos. Es importante analizar y comprender su función para poder compatibilizar en el modelo de elementos finitos aquellas entre elementos con diferentes grados de libertad. A continuación, se describen y caracterizan las uniones principales.

#### Uniones del cable principal con torres y anclajes:

Tal y como se mencionó en párrafos anteriores, el cable principal se compone de tres tramos continuos dispuestos entre los anclajes extremos y las torres.

En la figura 2.11 se muestra el dispositivo de unión entre el cable principal y la torre, esta imagen corresponde a un plano que compone la documentación analizada. Se informa que el cable principal es único y que éste se vincula en la punta de las torres mediante un cabezal que lo "enhebra" pero no lo fija. Aquí la unión obra de apoyo doble e impide el desplazamiento vertical en eje z y transversal en eje y. Si bien hay dos orificios, la unión se realiza solo en uno, reservando el otro para el montaje / mantenimiento.

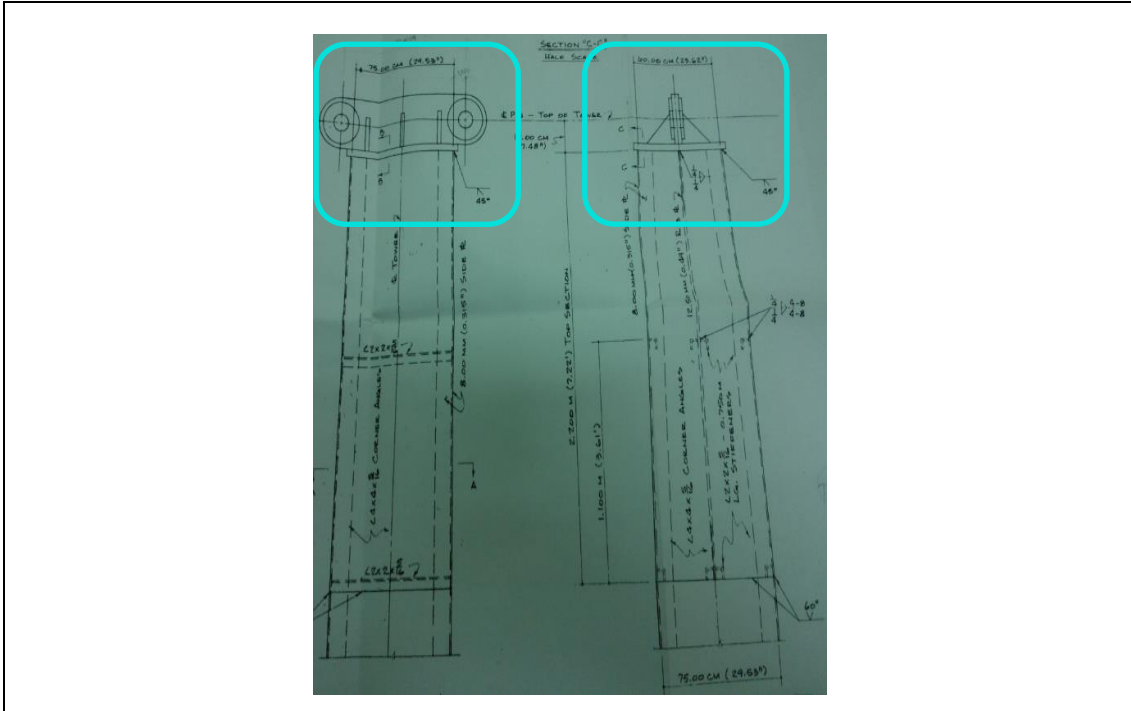


Figura 2.11: Cabezal de Torres para enhebrar el cable principal: unión tipo apoyo doble.

En los puntos extremos del cable principal donde se vincula a los anclajes, el tipo de unión es distinta. Aquí no se permite ningún tipo de desplazamiento, por lo tanto, se considera como un apoyo fijo. Esto se muestra en la figura 2.12, donde se observa el amarre de los cables a una masa de hormigón enterrada. En este punto fijo también se anclan los cables de viento que en su otro extremo se vinculan a la punta de las botavaras (brazos) de la torre.

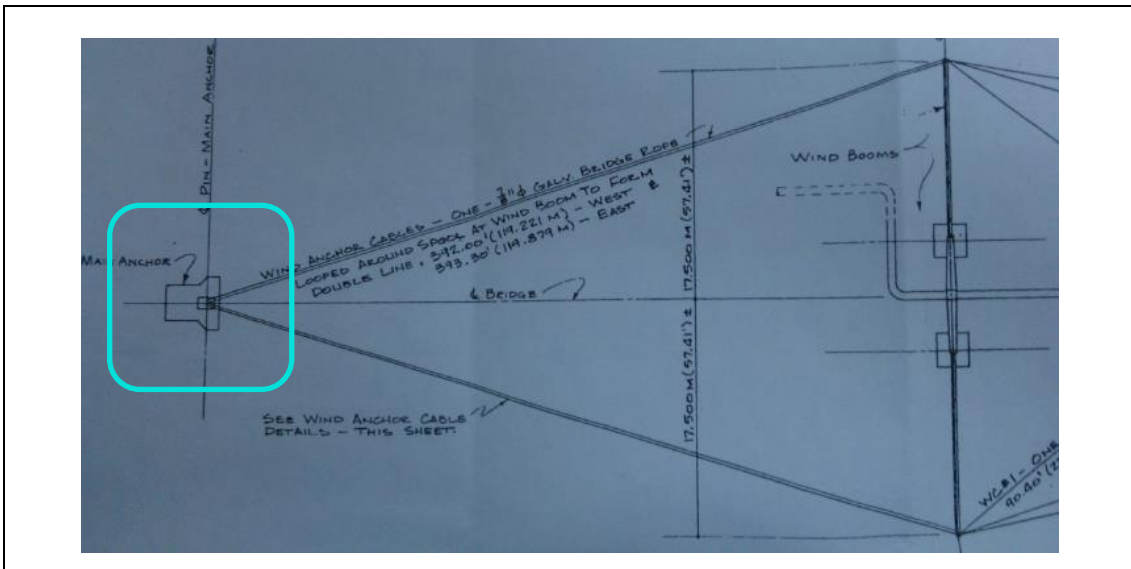
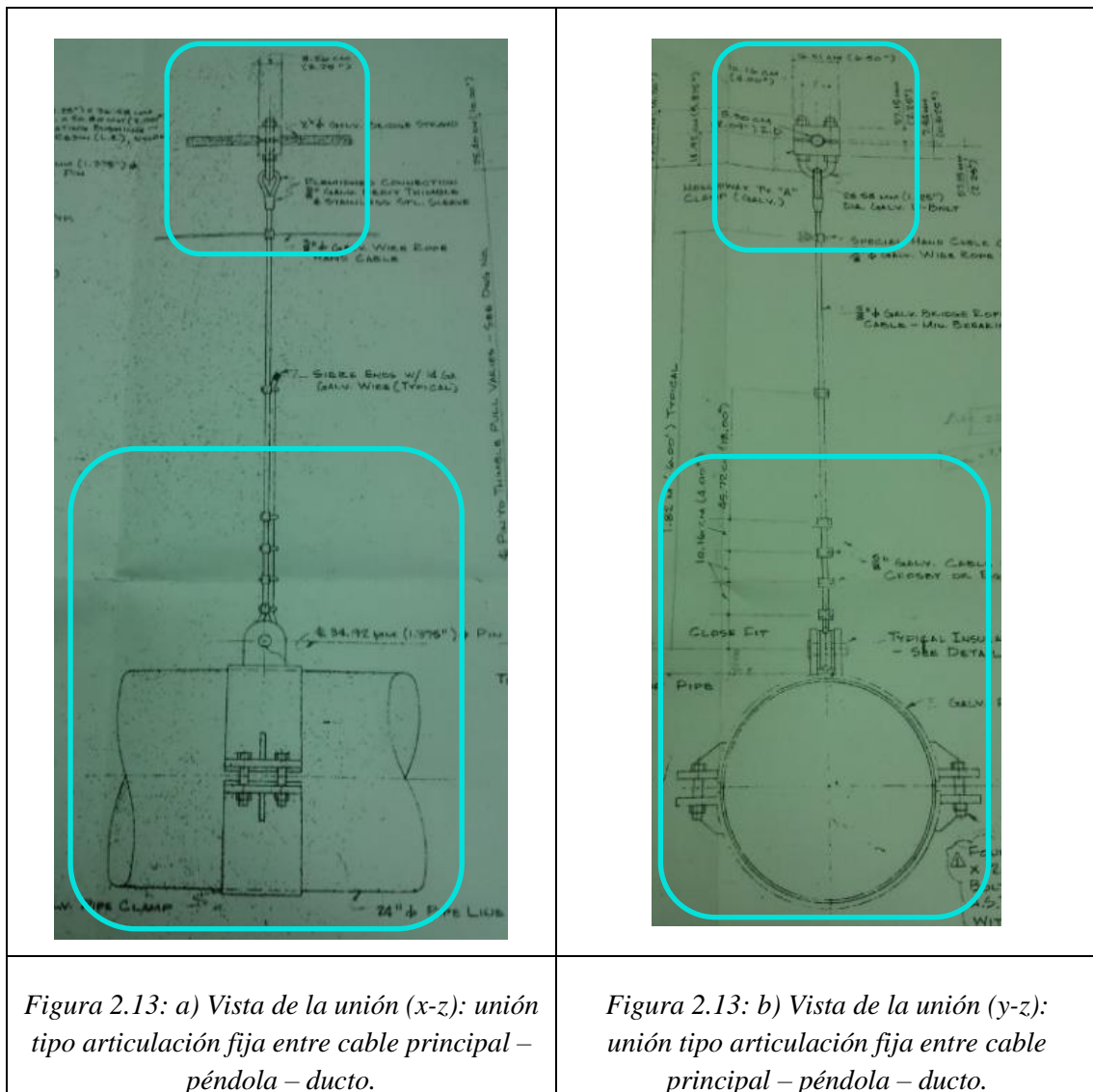


Figura 2.12: Anclaje de cable principal y cables de viento: unión tipo apoyo fijo.

### Uniones entre cable principal, péndolas y tubería:

La tubería se vincula al cable principal mediante veintisiete péndolas. La unión del cable principal y las péndolas se efectúa mediante la colocación de dispositivos de sujeción, los cuales se observan en el recuadro superior de las figuras 2.13 a) y b). Sobre el cable principal y cada 8,80m se fija un morseto o grampa prensa cable metálica del tipo “Fist Grip” en combinación con una abrazadera tipo “u-bolt” y como terminación se coloca un guardacabo. De manera tal que se fija la posición de cada péndola sobre la trayectoria del cable. Sobre el guardacabo se enhebra y vincula el extremo superior de la péndola. Esta unión entre cables se asemeja a una articulación fija.



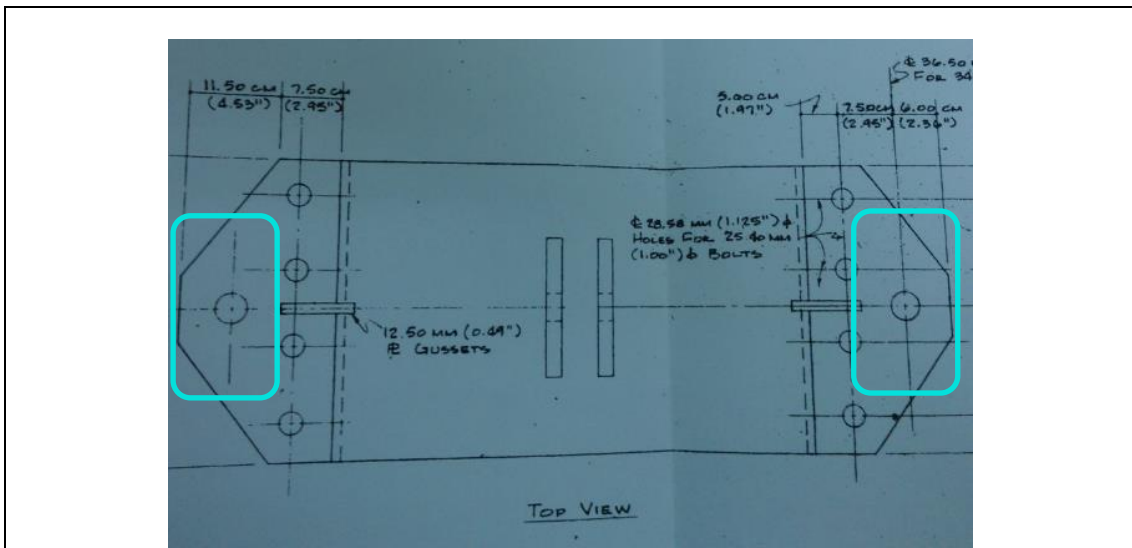
En la tubería y coincidentemente cada 8,80m se coloca una abrazadera metálica sobre la cual se sueldan dos cartelas perforadas que sujetan el cojinete donde se enhebra, anteponiendo un aislante eléctrico, el extremo inferior de la péndola que materializa el

soporte de la tubería (recuadro inferior de las figuras 2.13 a) y b)). De esta manera se vinculan las péndolas al cable principal en el extremo superior y a la tubería en el extremo inferior. El largo de cada péndola se fija con “clips”, “prensa cables”. Esta unión también se asemeja una articulación fija.

La unión péndola-ducto es fundamental para el modelo, físicamente se materializa por los accesorios que se indican en las imágenes 2.13 a) y b). En los puntos de unión confluyen dos tipos de elementos estructurales con distinto comportamiento frente a un mismo estado de sollicitación: el ducto se asemeja a una viga que posee resistencia a flexión y el cable no solo no toma momentos, sino que tampoco admite compresión. Sobre ese punto el modelo de elementos finitos debe compatibilizar los desplazamientos, tema que se aborda más adelante en el Capítulo 5.

Uniones entre tubería y cables de viento:

Los cables de viento se vinculan a la tubería mediante su amarre a seis cartelas, como la indicada en la figura 2.14, las cuales se encuentran instaladas en el ducto. Sobre los extremos existe un orificio en el cual se amarra y vincula el extremo del cable lateral de viento que se liga al ducto, el otro extremo se vincula a los brazos de la torre.



*Figura 2.14: Abrazadera de tubería con cartelas laterales para cables de viento: unión tipo articulación fija.*

Uniones entre cables de viento y torres:

Las botavaras de las torres (brazos) funcionan como elementos de arriostamiento lateral de la tubería, tal y como se observa en la imagen 2.15.

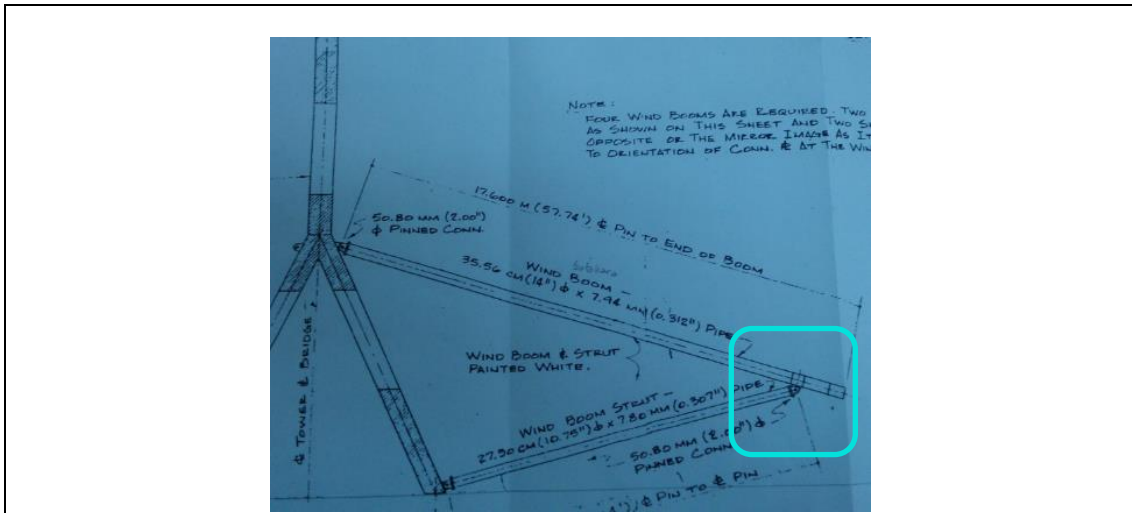
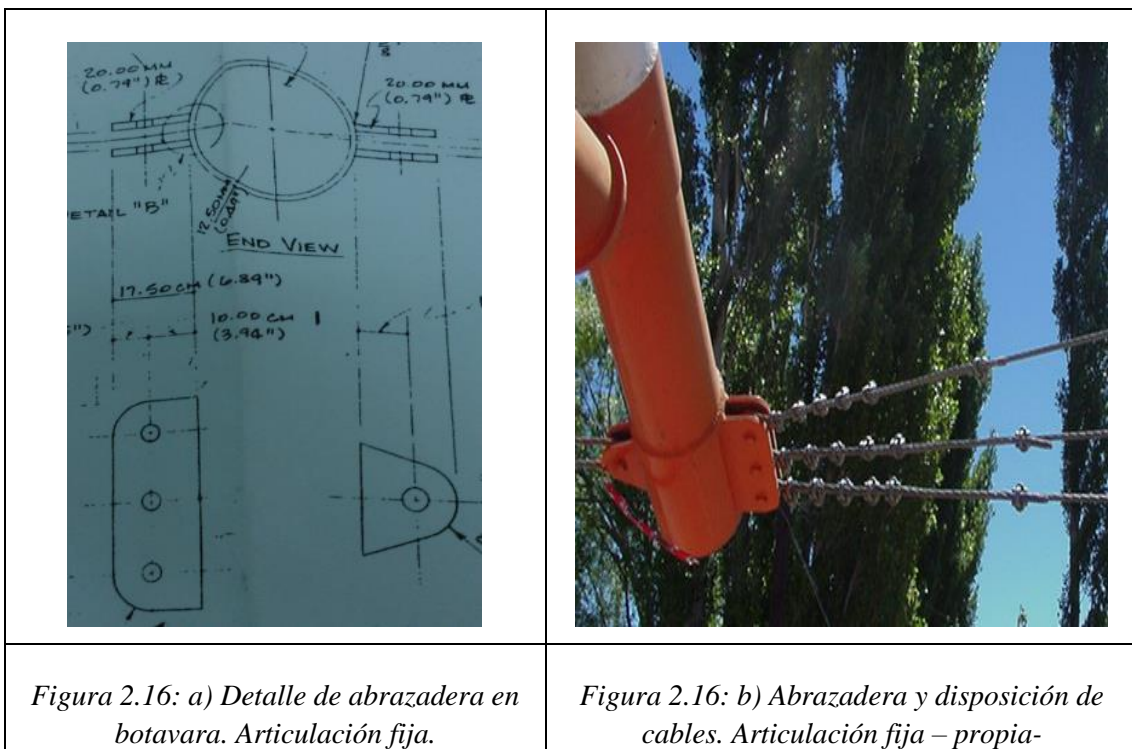


Figura 2.15: Botavara de las torres y cables de viento, unión tipo articulación fija.

Sobre los extremos de las botavaras se dispone una cartela que cuenta con tres orificios donde se amarran los cables de viento y otro orificio que permite enhebrar el cable que se fija al anclaje extremo, tal y como se observa en las imágenes 2.16 a) y b).



De esta manera quedan descritas las uniones principales entre los distintos elementos contenidos en la estructura.

#### 2.2.4 Vinculación externa.

El sistema estructural cuenta con ocho puntos de vinculación externa; dos en cada torre, dos en los extremos del cable principal (anclajes, descrito en ítem anterior) y dos en los extremos del ducto. En la figura 2.2 se muestra la ubicación de estos puntos.

##### Vinculación externa en torres: Fundaciones.

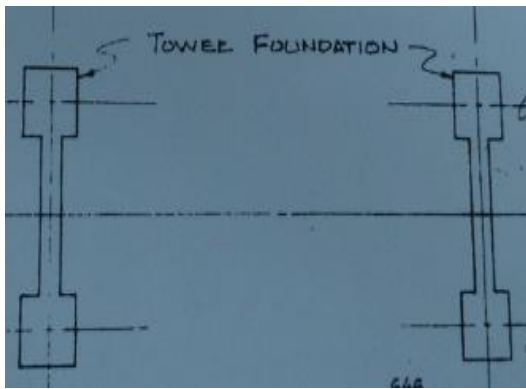

Cada una de las torres en su parte inferior posee una fundación de hormigón donde se vinculan cada pie de apoyo tal como se muestra en imágenes 2.17 a) y b). Este tipo de vinculación impide cualquier desplazamiento o rotación de las torres, motivo por el cual se consideran empotramientos perfectos. Es decir, cada torre cuenta con dos puntos de empotramiento inferiores.

##### Vinculación externa en cable principal: Anclajes.

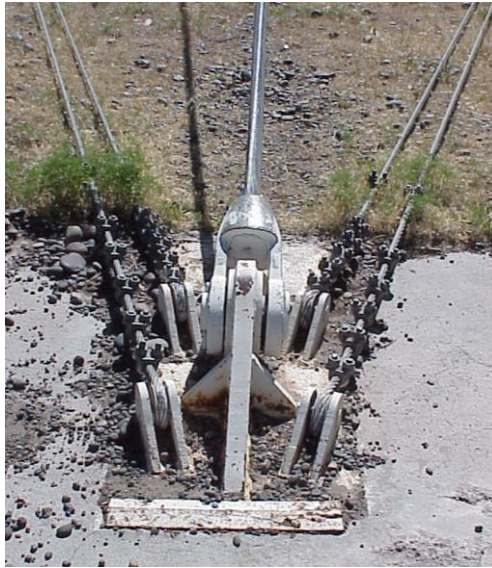
En la imagen 2.18 se muestran dos sistemas de anclaje en el mismo punto: en el centro se ubica el anclaje extremo del cable principal y sobre los bordes el anclaje de los cables de viento provenientes de las botavaras de las torres. Aquí, el tipo de vinculación impide el desplazamiento de los tensores en cualquier dirección, tal y como un apoyo fijo.

##### Vinculación externa en ducto: Ingreso subterráneo.

Finalmente, y en la figura 2.19 se observan los puntos extremos de la línea, se registra que el ducto ingresa en el suelo y vuelve a ubicarse bajo la cota de tapada correspondiente, asimilándose a un empotramiento ya que en dichos puntos el ducto tiene impedidos el desplazamiento y la rotación, asemejando un empotramiento.

	
<p><i>Figura 2.17: a) Fundación de ambas torres. Empotramiento.</i></p>	<p><i>Figura 2.17: b) Vinculación de bases y fundación. Empotramiento. -propia-</i></p>





*Figura 2.18: Anclaje de cable principal y cables de viento. Apoyo fijo. –propia-*



*Figura 2.19: Tramos extremos del ducto. Empotramiento. –propia-*

De esta manera quedan definidos y detallados los tres tipos de vinculación externa que presenta el sistema estructural, indicando en cada caso el tipo de restricción que representa.

### **2.3 INFORME DE RELEVAMIENTO GEOMÉTRICO IN SITU.**

El relevamiento geométrico se realizó mediante el posicionamiento de equipos de georreferenciación de alta precisión, abarcando todos los puntos destacados de la estructura. Luego, los datos fueron procesados y comparados con los registrados en los planos. A continuación, se presentan gráficos comparativos de posición, particularmente interesa analizar los elementos que registran mayor desplazamiento: cable principal y ducto.

En el cable principal los puntos relevados se corresponden con el morseto de sujeción de péndolas, por lo tanto, se asume que representan el centro del cable. En la figura 2.20 se observa la gráfica de posición del cable principal según planos y según el último relevamiento realizado (actual). De las gráficas se evidencia un descenso del cable principal, el cual registra un valor máximo en el centro, de 0,65m.

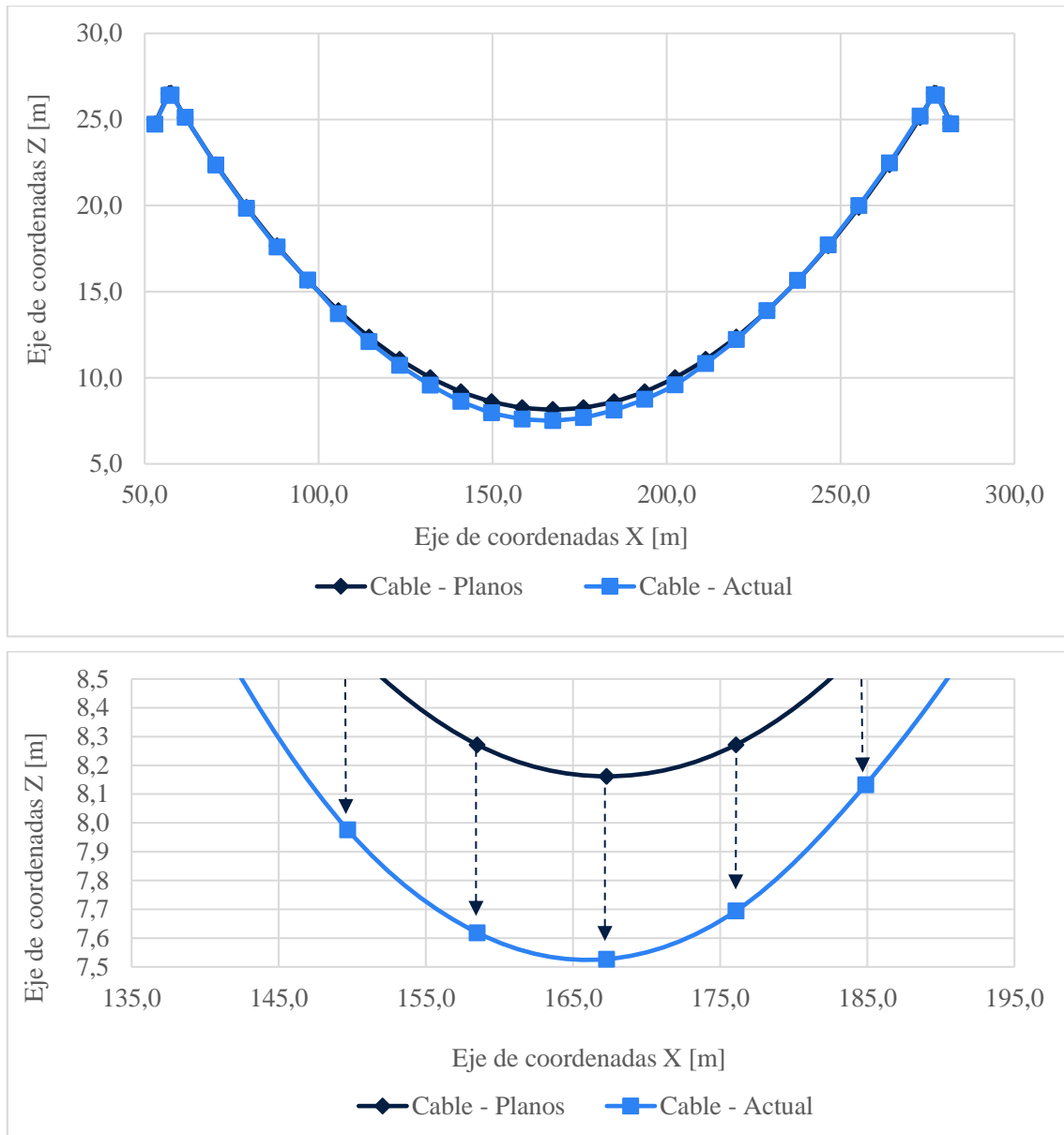


Figura 2.20: Comparación de posiciones en plano x-z de Cable principal (vertical).

En el ducto los puntos relevados se corresponden con el orificio de la cartela donde se enhebra la péndola, indicado en figura 2.21. Asumiendo el ducto como una estructura que mantiene sus caras planas y la sección uniforme este valor se considera como representativo de la línea del ducto. No tiene sentido llevar la referencia al eje ya que en

el proceso de readecuación geométrica es necesario mantener el control referenciado a un punto de fácil distinción visual.

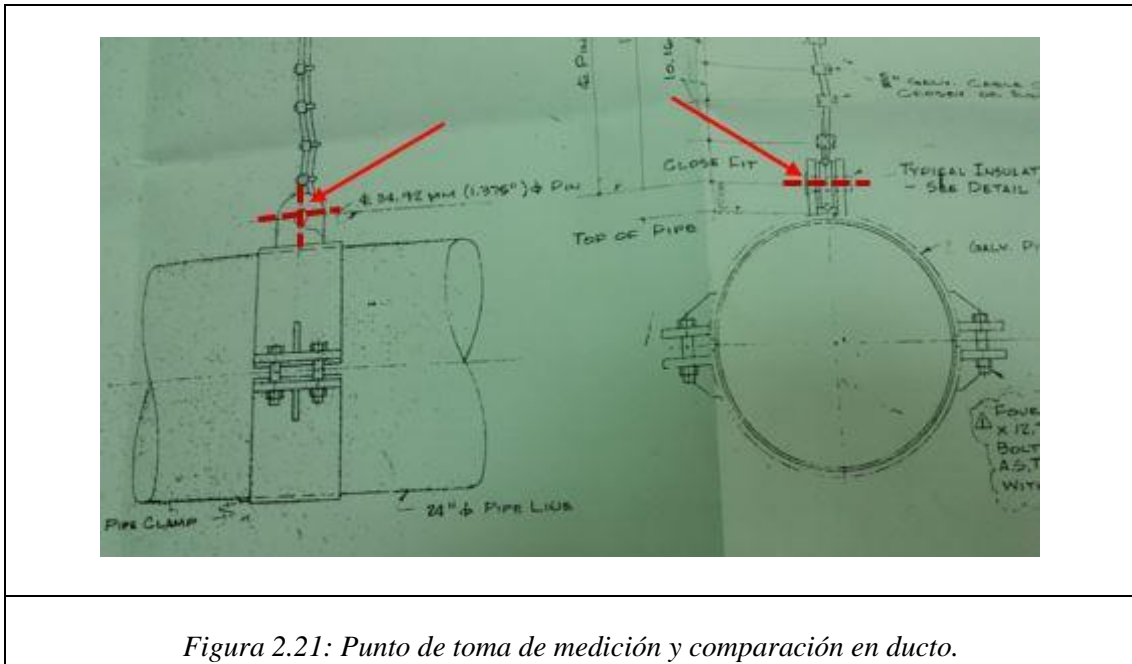


Figura 2.21: Punto de toma de medición y comparación en ducto.

En la figura 2.22 se observa que el descenso del ducto es consistente con el desplazamiento del cable principal; también se desarrolla en el centro y registra un valor máximo de 0,63m. Se recuerda que en el desarrollo del trabajo se ha considerado nivel horizontal del eje del ducto la cota  $z=6,488m$ . Del relevamiento, y también en consistencia con el tipo de estructura y sus vinculaciones extremas, se observa que los extremos del ducto se han desplazado hacia arriba de la posición del eje, coincidente con la deformada de una viga con vínculos de empotramiento.

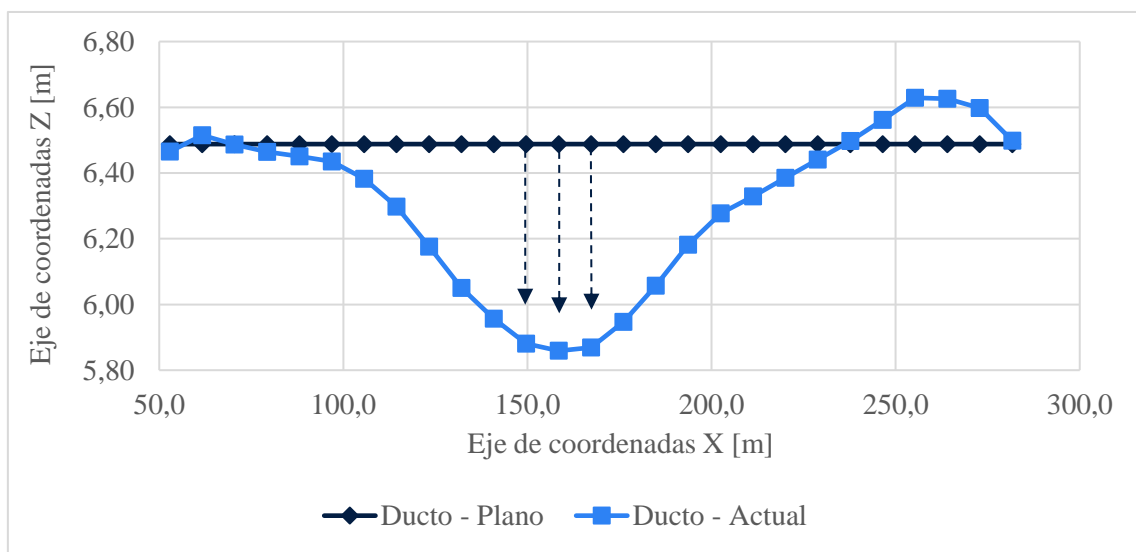


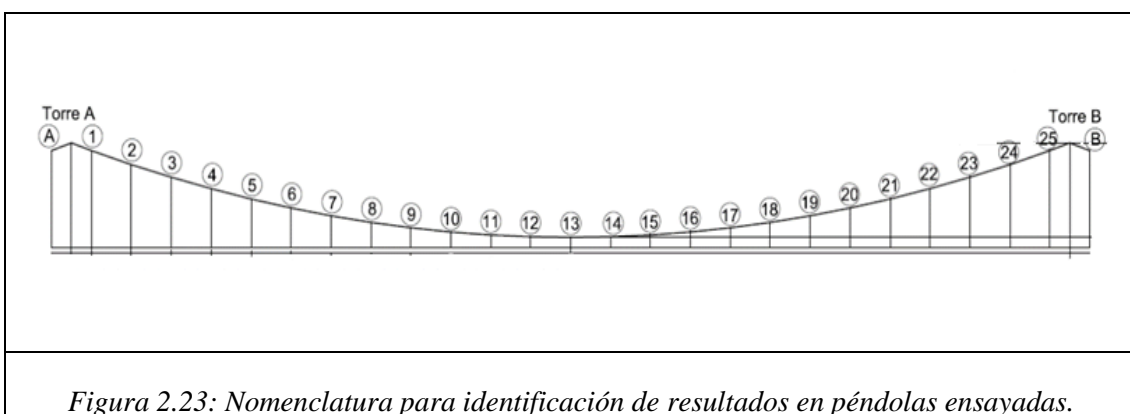
Figura 2.22: Comparación de posiciones en el plano x-z de Ducto (vertical).

## 2.4 ENSAYOS DINÁMICOS EN PÉNDOLAS.

En dos oportunidades (año 2000 y 2014) se realizaron ensayos dinámicos con motivo de evaluar el estado tensional de ciertos elementos estructurales. El objetivo de medir la fuerza en cables es contar con estos valores para establecer de manera efectiva el equilibrio estático de la estructura y calibrar el modelo numérico del sistema. Dada la configuración, accesibilidad a la estructura y condición, las mediciones utilizadas solo corresponden con la fuerza axial en las péndolas.

Del documento [2] se explica el procedimiento indirecto utilizado para medir la fuerza se basa en registrar el período fundamental de vibración de los cables a través de vibraciones transversales inducidas por leves perturbaciones, provocadas manualmente. La técnica utilizada para la estimación de las fuerzas consiste en ajustar un modelo particular de estos cables de tal forma de reproducir la frecuencia fundamental de vibración medida in situ. Aquí la rigidez geométrica de los cables, considerados como cuerda ideal varía linealmente con la fuerza axial. No obstante, masa adicional en uno o ambos extremos de estos cables debido a los tramos excedentes para sujeción y el peso del operario que realizo el ensayo quien se encontraba parado sobre el ducto al momento del ensayo, inducen ciertas singularidades las cuales impiden la utilización de fórmulas analíticas para las frecuencias de la cuerda ideal, válidas sólo para elementos de masa uniforme.

A continuación, en la tabla 2.6 y según la nomenclatura mostrada en la figura 2.23 se indican los resultados de los ensayos dinámicos, ejecutados en el año 2000 y año 2014.



A continuación, en la tabla 2.6 se indica el valor medio de las fuerzas en las péndolas verticales estimadas en '14 (abril-2014) resulta consistente con las estimadas en '00 (noviembre-2000). Este valor es importante para la calibración/validación del modelo numérico.

	Long.	Fuerza '00	Fuerza '14	$\Delta$ Fza.
Posición	[m]	[N]	[N]	[%]
A	18,13	17800	17000	-4,5%
1	18,48	17800	17800	0,0%
2	15,75	15700	16000	1,9%
3	13,27	11600	12000	3,4%
4	11,03	12300	12700	3,3%
5	9,03	10300	10300	0,0%
6	7,26	11300	11100	-1,8%
7	5,73	11400	11600	1,8%
8	4,44	11300	13700	21,2%
9	3,38	7500	9000	20,0%
10	2,56	7800	10800	38,5%
11	1,98	14600	12200	-16,4%
12	1,63	13700	10200	-25,5%
13	1,52	13100	9200	-29,8%
14	1,63	10700	8600	-19,6%
15	1,98	5000	6900	38,0%
16	2,56	13700	10300	-24,8%
17	3,38	20400	17400	-14,7%
18	4,44	8200	10200	24,4%
19	5,73	15200	15600	2,6%
20	7,26	4400	12700	188,6%
21	9,03	16400	17100	4,3%
22	11,03	12400	12000	-3,2%
23	13,27	9600	11700	21,9%
24	15,75	12800	13800	7,8%
25	18,48	15000	13200	-12,0%
B	18,13	17800	18100	1,7%
Promedio		12511	12637	

Tabla 2.6: Resultados de ensayos dinámicos en péndolas. -De [2]-.

## 2.5 CONCLUSIÓN.

Se ha descrito, analizado y caracterizado toda la información con la cual se contaba al momento de comenzar el trabajo. De planos se obtuvieron principalmente la geometría y secciones nominales. De los relevamientos y ensayos se obtuvieron datos para ratificar los resultados del modelo teórico que se desarrolla en el Capítulo 4 y luego calibrar el modelo de elementos finitos del Capítulo 5. Durante los siguientes capítulos se irá completando la información necesaria para la elaboración de un MEF que reproduzca el estado tensional y deformaciones actuales y permita simular la propuesta de readecuación geométrica y su efecto en la estructura.

## **3 CAPÍTULO: PROPUESTA DE READECUACIÓN GEOMÉTRICA.**

---

### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

Este Capítulo tiene como objetivo describir la propuesta técnica de readecuación geométrica y los motivos por los cuales se concibe como una opción factible y con facilidades de ejecución.

La solución propuesta para la alineación de la tubería es concebida bajo la consideración de evitar el uso de barcazas y/o grandes grúas debido a la dificultad operativa que conlleva la presencia del río. De las campañas de inspección realizadas a la estructura se verifica que el estado de las péndolas es satisfactorio y no es necesario cambiarlas, sí deben ser retesadas. Considerando esto, se propone elevar el ducto por efecto del retesado de las péndolas. Es importante destacar que el tipo de tecnología actual instalada en los cables impide el retesado de las péndolas, por lo tanto, la propuesta no sólo se enfoca en la corrección del desvío sino también en la selección e inclusión de tecnología sencilla que facilite la ejecución y el futuro mantenimiento.

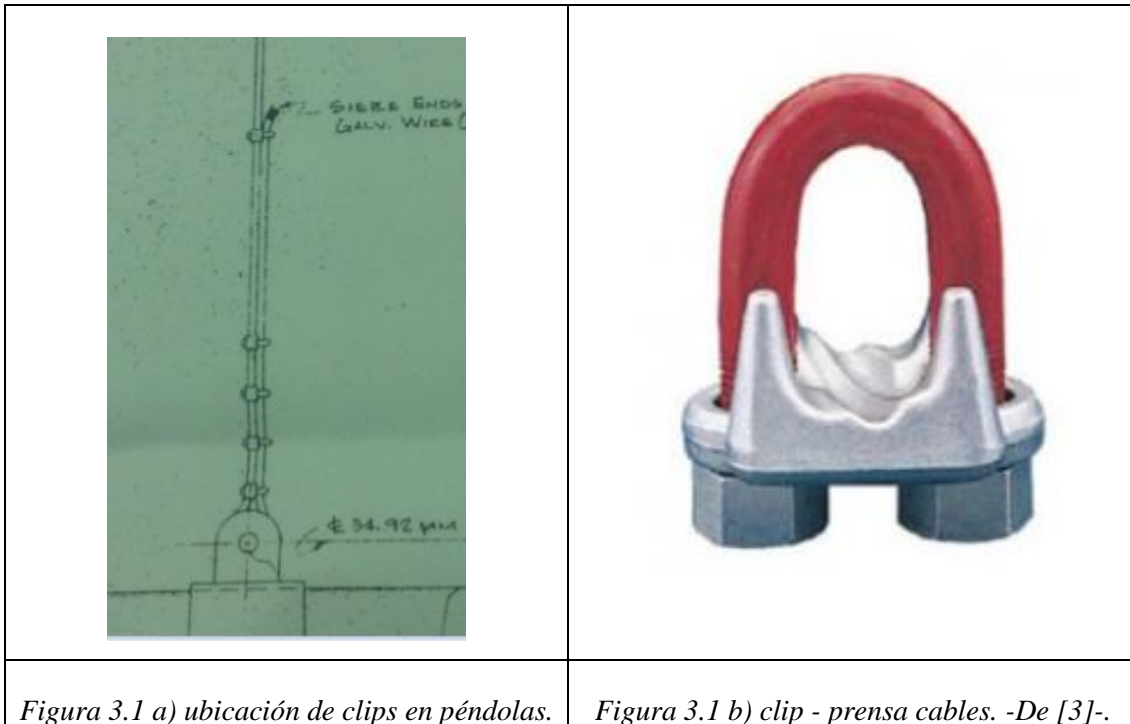
La propuesta se describe según un procedimiento que tiene como requisito principal asegurar que las tensiones generadas en el ducto durante la corrección no superen el valor límite admisible. A continuación, y durante el presente Capítulo solo se describe la metodología de ejecución de la propuesta, luego en el Capítulo 4 se indica el valor de tensión admisible y finalmente en el Capítulo 6 una vez verificadas las solicitaciones se detalla la secuencia y se dimensionan los accesorios a incluir.

### **3.2 TECNOLOGÍA ACTUAL DE LA ESTRUCTURA.**

La documentación gráfica de la estructura data del año 1979 y la fecha de puesta en marcha se estima fue en el año 1984. A continuación, se describe el tipo de tecnología que actualmente se encuentra instalada en los cables.

El tipo de dispositivo mediante el cual se fija la longitud de la péndola es un “clip”, “prensa cable”, del tipo mostrado en figuras 3.1 a) y b). Este tipo de accesorio no permite el retesado o reposicionamiento directo de los cables. Cada péndola cuenta con cinco clips en su parte inferior, los cuales deben ser manipulados en su totalidad para el reajuste

de longitud en la péndola. Para efectuar el ajuste geométrico propuesto es necesario incorporar accesorios que permitan la manipulación directa.



Por otro lado, es importante indicar que la estructura cuenta con un cable de vida que se extiende paralelo y a una altura de 1,5m del ducto (indicado en la figura 3.3), tal que permite el amarre seguro de un operario que acceda y se desplace sobre la cañería. Esta guía de seguridad será utilizada durante la ejecución de la readecuación, como se indicó anteriormente no se proyecta el uso de barcasas ni grúas, por lo tanto, los trabajos propuestos se realizarán por operarios con herramientas manuales.

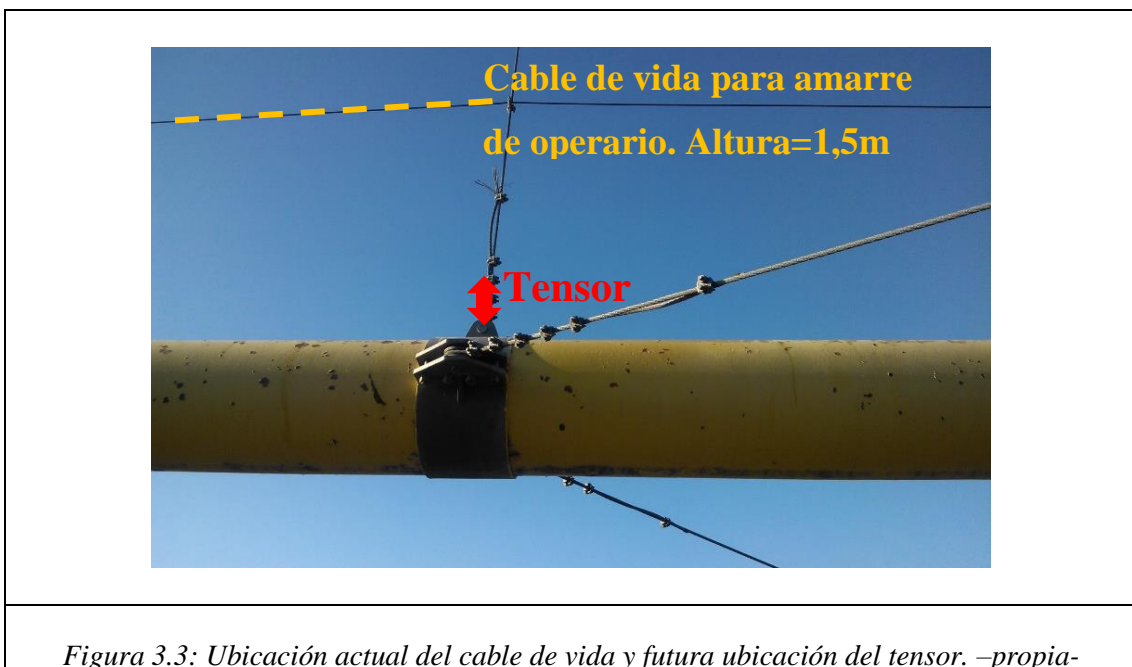
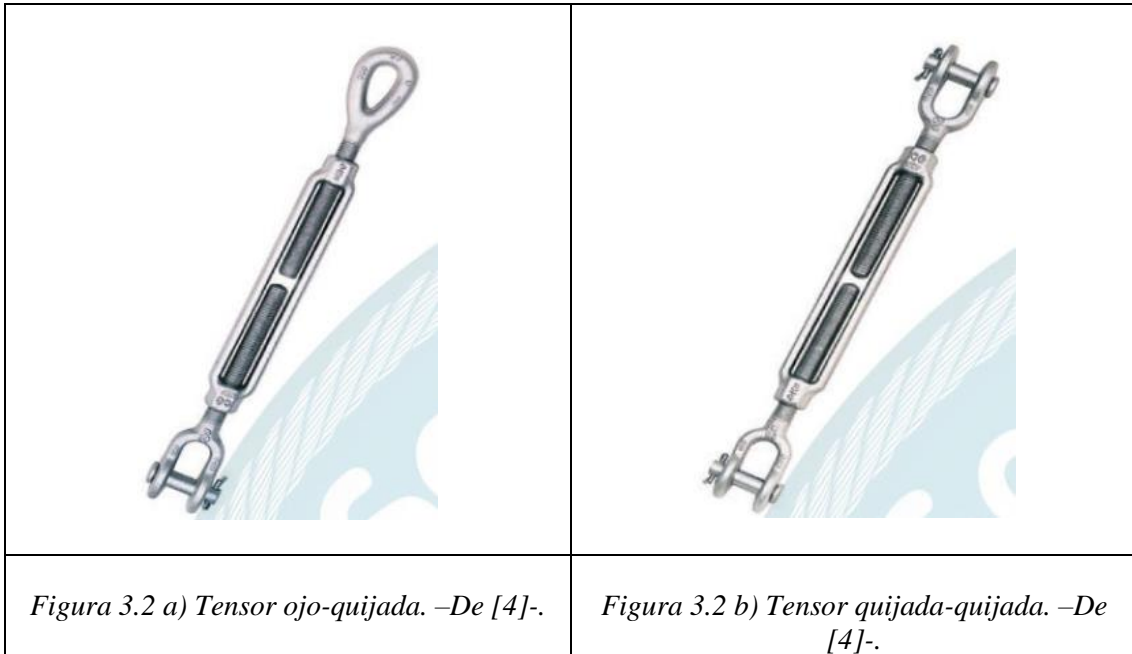
### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Los trabajos propuestos se realizarán en dos etapas complementarias: instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15 y 5cm y a continuación secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm.

#### 3.3.1 Instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15 y 5cm.

La primera etapa consiste en la instalación de tensores en las péndolas pos-ejecución de la primera corrección de posición. La inclusión de tensores facilitara la corrección manual de la longitud en cables, podrán ser del tipo ojo-quijada o quijada-quijada, tal y como se muestran en la figura 3.2 a) y b).

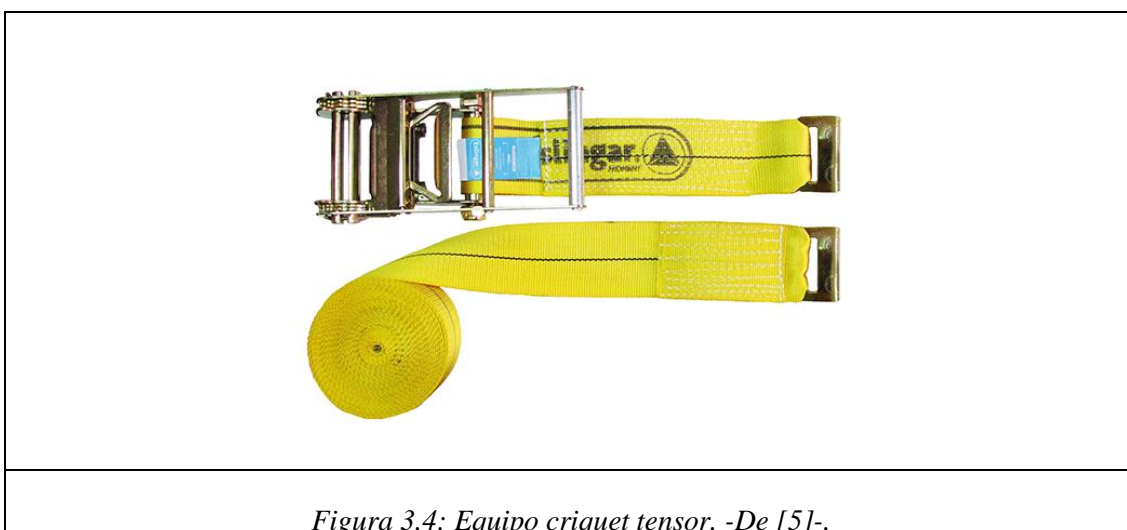
Se recomienda colocarlo entre la abrazadera de sujeción de la cañería y la péndola, como se indica en la figura 3.3. Esta ubicación del tensor se considera adecuada teniendo en cuenta que es accesible y posee condiciones seguras para el personal calificado que ejecute la tarea, quien deberá realizar el control de avance en la sección roscada y posteriores tareas de ajuste en caso de que se requiera.



Los veintisiete tensores (uno en cada péndola) se colocarán siguiendo un orden. Tendrá inicio en las péndolas centrales de la catenaria y, simétricamente, seguirá hacia ambas torres. Es importante que las acciones sean tomadas de modo simétrico, dada la



sensibilidad de estas estructuras a las acciones no simétricas. La instalación de los tensores en cada péndola incluye pasar dos eslingas sintéticas (una de seguridad) por encima del cable principal y por debajo de la tubería, de manera tal de poder unir los extremos a un criquet tensor (eslinga + criquet tensor = equipo criquet tensor) del tipo mostrado en figura 3.4. Una vez vinculadas y posicionadas las eslingas sintéticas se procede a indicar al operario de la estación total que se está en condiciones de iniciar el tesado de estas (eslingas) y se efectúa la primera corrección elevando el ducto entre 15 y 5cm (según corresponda). Una vez en la posición requerida se acciona la traba en el criquet, de manera tal que se mantenga la posición y se verifiquen las condiciones seguras de trabajo.



En esta instancia donde el ducto se encuentra sostenido y posicionado por las dos eslingas sintéticas, se procede a retirar las cinco abrazaderas (clips, prensa cables) de sujeción de la péndola y se la desenlaza para poder instalar el tensor. Asegurando que los vástagos roscados del tensor estén insertados, se procede a completar con el avance de roscado mínimo. Finalmente se sujeta la cola de la péndola al tramo principal mediante la colocación de los cinco “clips”, “prensa cables” de sujeción, cuidando la correcta colocación de estos (según las indicaciones del fabricante y en caso de ser necesario reponer los que se encuentren dañados).

Tener en consideración que la longitud máxima a corregir de 0,63m, es una magnitud que no podrá ser completa y totalmente cubierta por el largo del roscado de un tensor. Motivo por el cual, haciendo uso de que en cierta instancia el ducto está sostenido por las eslingas y que se desajustan los clips-prensa cables, se tensan las eslingas (accionando sobre el criquet tensor) y se corrige 15-5cm la posición del ducto previo a colocar el tensor.

De esta manera se disminuye parte del desplazamiento total del ducto, se incorporan los tensores a las péndolas y el sistema queda listo para comenzar con la secuencia de reposicionamiento.

### 3.3.2 Secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm.

Una vez los tensores estén correctamente instalados y comiencen a tomar carga, se procede con la segunda etapa, denominada etapa de reposicionamiento que comprende directamente el retesado de las péndolas. Se ejecutará mediante una secuencia de pasos de manipulación controlada sobre los tensores tal que se corrija la posición del eje de la tubería llevándolo, en la medida de lo posible, hacia la posición de diseño.

El reposicionamiento de la tubería se efectúa mediante sucesivas operaciones de tesado/ajuste del sistema péndola-tensor, según desplazamientos de 5cm, realizado por operarios instalados en la parte superior de la tubería con los correspondientes elementos de seguridad. Las péndolas se tensan afectando la posición de la tubería y del cable principal. El parámetro adoptado para el control de esta operación (y de cada desplazamiento del ducto) es la posición del perno superior que une las dos cartelas de sujeción soldadas a la abrazadera que soporta la tubería. La posición de dicho punto material de la estructura es posible de ser controlada con precisión y confiabilidad mediante la utilización de la estación total desde las márgenes del cauce, ya que es un punto de fácil identificación, se indica con una flecha en la figura 3.5 (también se lo ha indicado en figura 2.21).



Figura 3.5. Tensor para retesado y punto para control del desplazamiento. -propia-

Rectificar el ducto implica provocar desplazamientos y tensiones (que se calcularan mediante el MEF) sobre este cuerpo metálico del cual se desconoce el estado actual de sollicitaciones y donde se evidencian los daños externos por corrosión. Es de esperar que el material reaccione ante estas interacciones de rectificación y los primeros desplazamientos de la propuesta puedan ejecutarse con mayor facilidad (menor fuerza) que los posteriores. Evidentemente el ducto no podrá rectificarse por completo y se presentará un estado tal que, aun efectuando un gran esfuerzo externo no se registren modificaciones geométricas perceptibles.

### 3.4 CONCLUSIÓN.

Se describe la propuesta analizando las dos etapas según las cuales se completará la readecuación geométrica: instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15-5cm y secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm.

La corrección del desplazamiento se plantea en dos etapas donde cada una se basa en un valor; la primera es de 15cm y 5cm durante la colocación de tensores y la segunda de 5cm durante cada paso de retesado de péndolas. En cada secuencia se irán elevando los puntos de la tubería, inicialmente mediante el equipo criquet tensor y a continuación con el retesado de las péndolas.

Es importante entender aquí que la propuesta incluye elevar puntos del ducto en consecuencia del descenso de los puntos homónimos del cable principal. Esta acción-reacción de elevación y descenso es lo que se simula el MEF buscando la opción que satisfaga los requisitos de tensión admisible en el ducto. Por lo tanto, el parámetro a simular y a controlar durante la ejecución es el desplazamiento vertical.

A modo de resumen se indican los pasos principales y a continuación en la figura 3.6 un esquema para condensar la información y retomar todo lo descrito aquí, luego en el Capítulo 6.

- 1- A ambos lados de la péndola se posicionan dos equipos criquet tensor, cada eslinga se enlaza a la parte superior del cable principal y la parte inferior del ducto.
- 2- Se acciona sobre el criquet tensando la eslinga y elevando 15-5cm el ducto.
- 3- Se procede a desenlazar la péndola e incorporar el tensor.
- 4- Una vez el tensor comience a tomar carga, se retiran las eslingas.
- 5- Se acciona sobre el tensor elevando 5cm el ducto.
- 6- Se acciona nuevamente sobre el tensor elevando 5cm el ducto.

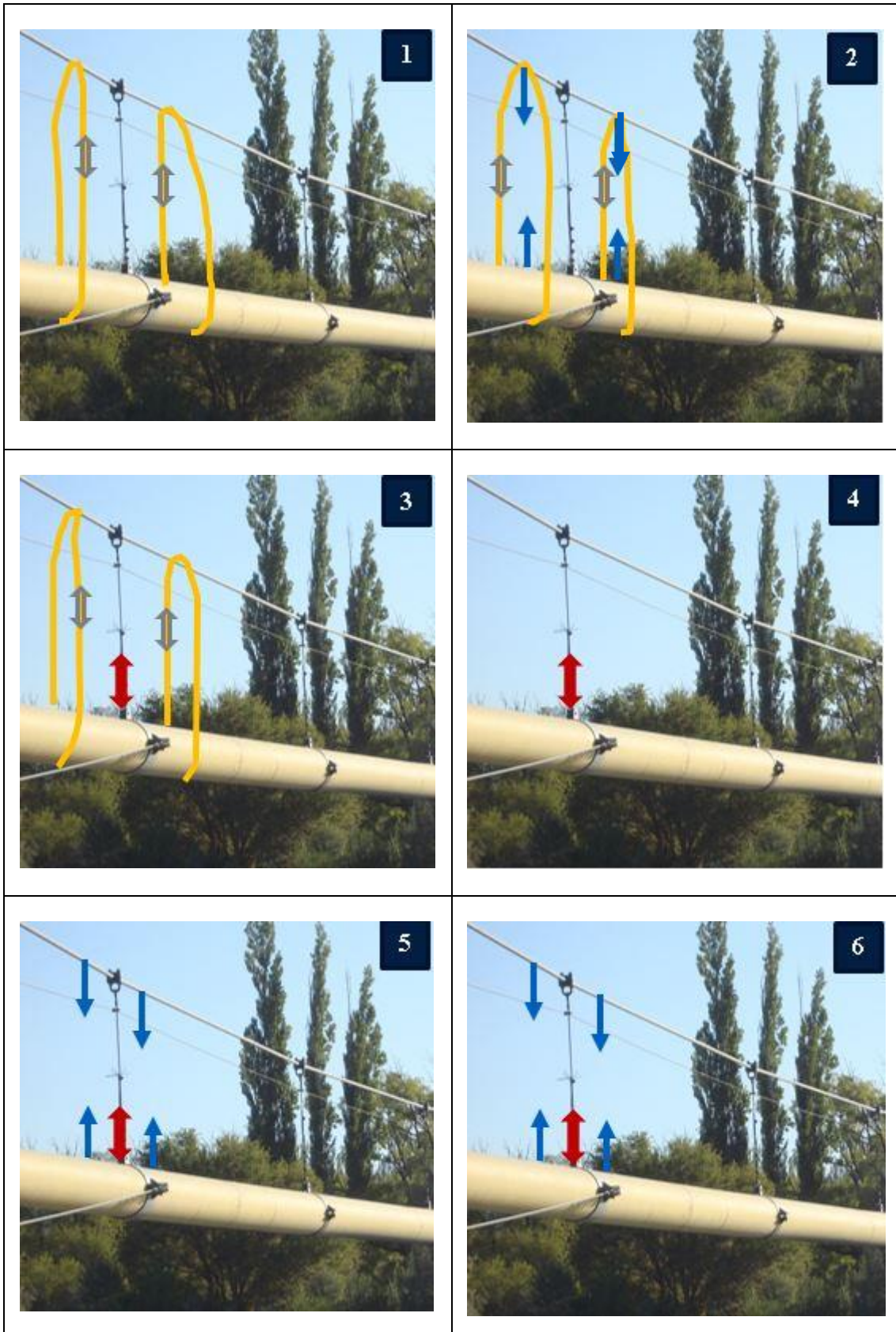


Figura 3.6: Esquema indicativo de los pasos principales durante la materialización de la Readecuación Geométrica de la Estructura Metálica. -propia-

## **4 CAPÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y ANÁLISIS TEÓRICO DE CABLES.**

---

### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

El presente capítulo se compone de dos partes; la primera cuyo objetivo es completar la caracterización de los elementos estructurales y la segunda donde el objetivo es calcular mediante la aplicación de un modelo teórico de estática y resistencia de materiales los valores de tensión y posición en los cables.

La información obtenida de la documentación gráfica, mediciones y ensayos, descrita en Capítulo 2, no es suficiente para caracterizar los elementos estructurales. Motivo por el cual se recurrió a estándares industriales y fabricantes en busca de los datos faltantes.

Tanto los valores registrados en las mediciones (posición y tensiones en péndolas) como los valores que se obtendrán del modelo de elementos finitos (desplazamientos y tensiones) deben ser contrastados y fundamentados en un modelo teórico que verifique ambos resultados.

### **4.2 CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

A continuación, y siguiendo el orden de la división 2.2.2 se completan los parámetros necesarios para la correcta caracterización de cada elemento estructural a modelar.

#### **4.2.1 Cable principal.**

Del estándar normativo para cables [10], catálogos de fabricantes [7], [8] y [9] y del documento [6] se extrae y contrasta la información no registrada en planos y necesaria para definir los datos requeridos para el armado del modelo numérico.

En la tabla 4.1 se indican los valores incorporados con \*. Se recuerda que CMR es la carga mínima de rotura mencionada en la sección 2.2.2. Para esfuerzos estáticos y asociados a elevación de cargas en general, la bibliografía recomienda que la carga segura de trabajo (CST) no supere el valor de carga mínima de rotura afectada por un coeficiente de seguridad CMR/FS, donde el factor de seguridad recomendado es 5. Por lo tanto y considerando esta recomendación se asume para el modelo como carga segura de trabajo del cable principal (CST-Cp) 480200 N.

Diámetro Nominal	*Sección	*Modulo Young	*Densidad	CMR	*CST-Cp
[pulg]	[pulg <sup>2</sup> ]	[Pa]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Tn]	[Tn]
2	2,4	1,65E+11	8330	245	<b>49</b>
[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	-	[N]	[N]
0,0508	0,00154	-	-	2401000	<b>480200</b>

Tabla 4.1: Parámetros del cable principal. Factor de Seguridad =5. \*Incorporaciones del Capítulo 4 a la tabla 2.1.

Notar que la densidad del torón es mayor que la densidad del acero estructural convencional.

#### 4.2.2 Cables secundarios (péndolas).

Del estándar normativo para cables [11], catálogos de fabricantes [7], [8] y [9] y del documento [6] se extrae la información no registrada en planos. En tabla 4.2 se indican los valores incorporados con \*. Se recuerda que CMR es la carga mínima de rotura mencionada en la sección 2.2.2. Adoptando el factor de seguridad igual a 5, se obtiene la carga segura de trabajo del cable secundario (CST-Cs) 35280 N.

Diámetro Nominal	*Sección	*Modulo Young	*Densidad	CMR	*CST-Cs
[pulg]	[pulg <sup>2</sup> ]	[Pa]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Tn]	[Tn]
5/8	0,182	1,38E+11	8170	18	<b>3,6</b>
[m]	[m <sup>2</sup> ]	-	-	[N]	[N]
0,0158	1,174E-04	-	-	176400	<b>35280</b>

Tabla 4.2: Parámetros del cable secundario, péndola. Factor de Seguridad=5. \*Incorporaciones del Capítulo 4 a la tabla 2.2.

#### 4.2.3 Ducto.

Los antecedentes del ducto sólo incluían información del diámetro y espesor. No se tiene registro de la memoria de cálculo, trazabilidad de las uniones soldadas, procedimientos de soldadura ni especificación de materiales. Motivo por el cual se procede a analizar cada parte constituyente (material base y material de aporte), evaluando la resistencia y adoptando para el modelo la menor de éstas como tensión admisible de la cañería.

Evaluación de la resistencia del Material Base: Según lo indicado en la sección materiales del estándar internacional [12] y ratificado en la normativa nacional [13], por su proceso de fabricación la cañería de acero (sin costura) se constituye generalmente por alguno de los tres tipos de materiales especificados según ASTM A53, ASTM A106 ó API 5L. Al

no registrarse documentación que indique alguno de éstos y basado en la época de construcción, tipo de fluido y usos en la zona, se adopta como material base ASTM A53. Asumiendo el ducto fabricado con acero ASTM A53 grado B, los parámetros de resistencia del material base quedan especificados y se indican en la tabla 4.3.

Resistencia a Tracción	Tensión del Limite Elástico
[psi]	[psi]
48000	30000
[Pa]	[Pa]
3,31E+08	2,07E+08

Tabla 4.3: Parámetros resistentes del material base- ASTM A53. -De [14]-.

Evaluación de la resistencia del Material de Aporte: Por otro lado, considerando nuevamente la época de construcción, tipo de fluido, usos en la zona y lo que se puede inferir de la figura 8.1, se asume lo siguiente: las uniones soldadas fueron ejecutadas a tope según proceso SMAW (soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido) en combinaciones de pasadas con electrodos para aceros al carbono (denominados según AWS) E-60 y E-70. Considerando el menor aporte de resistencia que se corresponde con E-60, la resistencia de la soldadura es la indicada en tabla 4.4. Donde se adopta un valor del 70% del Limite Elástico debido al estado actual del revestimiento.

Resistencia a Tracción	Tensión del Limite Elástico	Resistencia de la Soldadura
[ksi]	[ksi]	[ksi]
60	48	33,6
[Pa]	[Pa]	[Pa]
4,30E+08	3,31E+08	2,31E+08

Tabla 4.4: Parámetros resistentes del material de aporte- E60. -De [15]-.

Resistencia por Penalización: Al desconocerse el tipo de materiales, proceso de fabricación y además no contar con ensayos ni registros, el estándar internacional [12] penaliza esta incertidumbre e indica que se debe asumir la resistencia de la unión soldada igual al límite de elasticidad de un material base con un valor de 24000 psi.

Esto define por completo el valor de resistencia de la unión soldada, ya que es un valor menor que los supuestos para un material base ASTM A-53 grado B y un material de aporte E-60.

Tampoco se obtuvieron valores registro de operación del ducto; tal y como Presión de Diseño o Presión Máxima de Operación que permitan hacer el cálculo tensional que sugiere la normativa para evaluar ductos en operación. Por lo tanto, el presente trabajo considera como carga segura de trabajo del ducto y las uniones soldadas al valor de penalización afectado por un Factor de Seguridad que lo disminuye un 30%. El valor de la carga segura de trabajo del ducto (CST-D) se indica en la tabla 4.5. Las incorporaciones del Capítulo se representan con \*.

Diámetro	Espesor	*Sección	*Tensión del Limite Elástico	*CST-D
[pulg]	[mm]	[pulg <sup>2</sup> ]	[psi]	[psi]
24	7,75	2,26	24000	<b>16800</b>
[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[Pa]	[Pa]
0,6096	7,75E-03	0,0146	1,65E+08	<b>1,15E+08</b>

Tabla 4.5: Parámetros del ducto. Factor de Seguridad=1,42. \*Incorporaciones del Capítulo 4 a la tabla 2.4.

El tipo de acero al carbono que se asume conforma el ducto, es el mismo que el tipo de acero que conforma las torres: acero al carbono convencional. En la tabla 4.6 se indican los valores característicos de este material.

*Modulo Young	*Densidad
[Pa]	[Kg/m <sup>3</sup> ]
2,1E+11	7850

Tabla 4.6: Caracterización del tipo de acero que compone el Ducto y Torres.

De esta manera quedan definidos y caracterizados completamente los datos para el modelo computacional. Todos los elementos del sistema se constituyen por algún tipo de acero de los indicados en esta sección (caracterizados por el Módulo de Young y Densidad) y poseen un valor límite de Carga Segura de Trabajo (CST).

### 4.3 MODELO TEÓRICO DEL CABLE.

En esta sección se evalúa la estructura según el modelo teórico de un cable suspendido entre dos apoyos y del cual se sostienen cargas puntuales y equidistantes. Como guía de análisis se utiliza la sección 7.7 “Fuerzas en Cables” del libro [16] y el documento [17]. El objetivo consiste en determinar los esfuerzos de diseño en los elementos tensores (cable principal y péndolas) y las posiciones de equilibrio, valores que luego permitirán



el ajuste del modelo MEF. Esto se realizará mediante un análisis de carga que permita obtener la condición de equilibrio estático del sistema estructural.

Los cables pueden dividirse en dos categorías de acuerdo con las cargas que actúan sobre ellos: cables que soportan cargas concentradas y cables que soportan cargas distribuidas. La primera es la condición de partida utilizada en el presente análisis. El procedimiento de análisis estático de puentes colgantes se fundamenta bajo las siguientes hipótesis:

- El cable es perfectamente flexible, sólo puede resistir esfuerzos de tracción.
- El cable es homogéneo y de sección constante.
- Las cargas que actúan en el cable hacen que en condiciones de servicio su comportamiento sea elástico, siguiendo la ley de Hooke.
- El eje del cable se desplaza solo en el plano vertical.
- La carga externa es vertical y distribuida sobre la proyección horizontal del cable.
- La viga de rigidez es horizontal (tubería), inicialmente recta, de inercia constante y (mediante péndolas) se sostiene del cable.

#### **4.3.1 Cargas estáticas.**

Los cables transmiten grandes fuerzas de tracción y no resisten esfuerzos de compresión. Tienen poca resistencia a flexión por lo que adoptan formas curvas en vez de permanecer rectos. Por lo tanto, el cable se considera como miembro cargado axialmente pues está sometido sólo a fuerzas de tracción. Cuando estas fuerzas de tracción están dirigidas a lo largo del eje, pueden variar tanto en dirección como en magnitud según la configuración del cable.

El sistema estructural de análisis se compone de un cable principal con vinculaciones extremas fijas, que mediante 25 péndolas centrales (posterior a cada torre existe una péndola más que para este análisis se omiten) sostiene un gasoducto en servicio. Las cargas estáticas corresponden al peso del conjunto de elementos estructurales y el fluido. A continuación, se desarrolla el análisis de cargas estático, resistido por el sistema de cables. En la figura A4.1 (ver Anexos) se indica el esquema y los valores considerados para los cálculos. Se conocen y son dato: las coordenadas y altura de los apoyos, coordenada y altura del punto más bajo del cable principal (punto central) y la distancia horizontal entre cada péndola (equidistantes). Los cálculos permitirán determinar la altura exacta de cada péndola y por lo tanto la trayectoria del cable principal bajo el estado de carga. Obteniendo información respecto de las tensiones y posición de diseño.

#### 4.3.2 Peso de cada elemento.

- Peso del ducto -  $P_d$

Tal y como la figura A4.1 lo indica, solo se considera la sección del ducto que se encuentra entre las torres. Se conoce la densidad del acero constituyente, la sección y la longitud. Se calcula el peso según:

$$P_d[N] = \rho_{Ae} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * V_d[m^3] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 247351,3 [N] \quad \text{[[ec. 4.1]]}$$

Donde:

$P_d[N]$  = *Peso del ducto, en Newtons.*

$\rho_{Ae} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] = 7850$ . *Densidad del acero estructural, en  $\frac{Kg}{m^3}$ . De tabla 4.6.*

$V_d [m^3] = 3,212$ . *Volumen del ducto, en  $m^3$ . De ec. 4.2.*

$g \left[ \frac{m^2}{s} \right] =$  *Valor de gravedad, en  $\frac{m^2}{s}$ . Se asume 9,81.*

$$V_d[m^3] = s_d[m^2] * l_d[m] = 3,212 [m^3] \quad \text{[[ec. 4.2]]}$$

$s_d[m^2] = 0,0146$ . *Sección transversal del ducto, en  $m^2$ . De tabla 4.5.*

$l_d[m] = 220$ . *Longitud del ducto, en m. De figura A4.1.*

- Peso del fluido -  $P_f$

Debido a las condiciones y características del fluido el mismo se asume como gas ideal, por medio de la ecuación que referencia dicho modelo fisicoquímico y considerando como presión de operación 1,86 Bar, en el documento [2] es el valor que se infiere a partir de un análisis de cromatografía hecho sobre el fluido, se calcula el peso.

$$P_{ideal} \left[ \frac{N}{m} \right] = 4,5 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Luego,

$$P_f[N] = P_{ideal} \left[ \frac{N}{m} \right] * l_d[m] = 990 [N] \quad \text{[[ec. 4.3]]}$$

Donde:

$P_f[N]$  = *Peso del fluido, en Newtons.*

$P_{ideal} \left[ \frac{N}{m} \right] = 4,5$ . *Peso por metro del fluido considerado como gas ideal, en  $\frac{N}{m}$ .*

$l_d [m] = 220$ . Longitud del ducto, en m. De figura A4.1.

- Peso de péndolas -  $P_p$

Tal y como la figura A4.1 lo indica, solo se consideran las secciones de las veinticinco péndolas que se encuentran entre las torres.

$$P_p [N] = \rho_{Ap} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * V_p [m^3] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 3125,7 [N] \quad \text{[[ec. 4.4]]}$$

Donde:

$P_p [N]$  = Peso total de las pendolas, en Newton.

$\rho_{Ap} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] = 8170$ . Densidad del acero de pendolas, en  $\frac{Kg}{m^3}$ . De tabla 4.2.

$V_p [m^3] = 0,039$ . Volumen total de pendolas, en  $m^3$ . De ec. 4.5.

$g \left[ \frac{m^2}{s} \right] =$  Valor de gravedad, en  $\frac{m^2}{s}$ . Se asume 9,81.

$$V_p [m^3] = s_p [m^2] * \sum_{i=1}^{25} l_{pi} [m] = 0,039 \quad \text{[[ec. 4.5]]}$$

$s_p [m^2] = 0,000174$ . Sección transversal de péndolas, en  $m^2$ . De tabla 4.2.

$l_{pi} [m]$  = Longitud de cada péndola. Se calculan con datos de la tabla 2.6.

- Peso del cable principal -  $P_c$

Tal y como la figura A4.1 lo indica, solo se considera la sección del cable principal entre las torres.

$$P_c [N] = \rho_{Acp} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * V_c [m^3] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 27685,8 [N] \quad \text{[[ec. 4.6]]}$$

Donde:

$P_c [N]$  = Peso del cable principal, en Newton.

$\rho_{Acp} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] = 8330$ . Densidad de acero del cable principal, en  $\frac{Kg}{m^3}$ . De tabla 4.1.

$V_p [m^3] = 0,338$ . Volumen de cable principal, en  $m^3$ . De ec 4.7.

$g \left[ \frac{m^2}{s} \right] = \text{Valor de gravedad, en } \frac{m^2}{s}. \text{ Se asume } 9,81.$

$$V_c[m^3] = s_c[m^2] * l_c[m] = 0,338 \quad \text{[[ec. 4.7]]}$$

$s_c[m^2] = 0,00154.$  Sección transversal del cable principal, en  $m^2$  de tabla 4.1

$l_c[m] = 220.$  Longitud del cable principal, en  $m$ . Se supone el valor, de figura 2.1

### 4.3.3 Peso total.

Se suman los resultados de las ec. 4.1, 4.3, 4.4, 4.6 y se obtiene el peso total requerido para el análisis.

$$P_T[N] = (P_d[N] + P_f[N] + P_p[N] + P_c[N]) * 1,1 = 307068,08 [N] \quad \text{[[ec. 4.8]]}$$

Ya que no se puede determinar con exactitud; longitud del cable principal y el peso que adicionan todos los accesorios metálicos, se incrementa el peso total en un 10%.

El valor indicado en ec. 4.8 se utilizará para el cálculo teórico de los esfuerzos y posición del cable principal.

### 4.3.4 Cálculo de Fuerza y posición.

Como se indica la figura A4.2 (ver Anexos), en este análisis se considera el cable principal unido en dos puntos fijos A y B, que soportan 25 cargas concentradas verticales de igual magnitud (correspondientes a las péndolas)  $P_1, P_2, P_3 \dots P_{25}$  y cuyo valor es:

$$P[N] = \frac{P_T[N]}{25} = 12282,72 [N] (1,22 Tn) \quad \text{[[ec. 4.9]]}$$

Cada una de estas cargas se encuentra en una línea vertical y la distancia horizontal desde el apoyo A hasta cada una es conocida (denominada  $dx A-P_i$ , en figura A4.2). También se conocen las distancias horizontal y vertical entre los apoyos. El objetivo aquí es determinar la forma del cable calculando las distancias verticales de péndolas.

Conociendo la progresiva de cada punto, la incógnita es la distancia vertical desde el apoyo A hasta cada uno de los puntos  $P=1, 2, 3 \dots 25$  ( $dz A-P_i$ ), como se indica en figura A4.2. También se desea calcular la fuerza de tracción (T) en cada uno de los segmentos del cable principal.

Del diagrama de cuerpo libre de la figura A4.2 (ver Anexos) se deduce que la pendiente de los segmentos de cable en A y B es desconocida, por lo cual cada una de las reacciones en A y B debe representarse con sus componentes incógnita  $R_{AX}$ ,  $R_{AZ}$ ,  $R_{BX}$  y  $R_{BZ}$ . En total se tienen cuatro incógnitas, las tres ecuaciones de la estática disponibles para verificar el equilibrio en el plano no son suficientes para determinar las reacciones en A y B. Se debe obtener una ecuación adicional considerando el equilibrio de una porción del cable, esto es posible ya que se conocen las coordenadas  $x, z$  del punto central C del cable, como se indica en las figuras A4.1 y A4.2 (ver Anexos). El procedimiento de cálculo incluye siete pasos hasta hallar el valor de todas las incógnitas.

- 1- Ecuación de equilibrio de momentos sobre la sección izquierda en el punto B para hallar  $R_{AZ}$ .

$$\sum M^B[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

Donde:

$M^B[N * m] =$  Momento de la fuerza en el punto de apoyo B, en  $N * m$ .

Sentido horario positivo  $\rightarrow +$ .

Se completa la ecuación según diagrama de cuerpo libre de figura A4.2.

$$\sum M^B = (R_{AZ} * dx_{A-B}) - (P * d_{1-B}) - (P * d_{2-B}) - (P * d_{3-B}) - \dots (P * d_{25-B}) = 0$$

$$\sum M^B = (R_{AZ} * dx_{A-B}) - (P * \sum_{i=1}^{25} d_{i-B}) = 0$$

Se calcula el valor requerido

$R_{AZ}[N] = \frac{(P * \sum_{i=1}^{25} d_{i-B})}{dx_{A-B}} = 153525 [N] \quad \text{[[ec. 4.10]]}$
---

- 2- Ecuación de equilibrio de momentos sobre la sección izquierda en el punto C para hallar  $R_{AX}$ .

$$\sum M^C[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

Donde:

$M^C[N * m] =$  Momento de la fuerza en el centro del cable C, en  $N * m$ .

Sentido horario positivo  $\rightarrow +$ .

Se completa la ecuación según diagrama de cuerpo libre de figura A4.2.

$$\sum M^C = (R_{AZ} * dx_{A-C}) - (R_{AX} * dz_{A-C}) - (P * d_{1-C}) - (P * d_{2-C}) - \dots (P * d_{12-C}) = 0$$

$$\sum M^C = (R_{AZ} * dx_{A-C}) - (R_{AX} * dz_{A-C}) - (P * \sum_{i=1}^{12} d_{i-C}) = 0$$

Se calcula el valor requerido

$$R_{AX}[N] = \frac{(R_{AZ} * dx_{A-C}) - (P * \sum_{i=1}^{25} d_{i-B})}{dz_{A-C}} = 457651 [N] \quad \text{[[ec. 4.11]]}$$

3- Ecuación de equilibrio de fuerzas verticales para hallar  $R_{BZ}$ .

$$\sum F_Z[N] \uparrow = 0$$

Donde:

$F_Z[N]$  = Fuerzas verticales, en N.

Sentido ascendente positivo  $\uparrow +$ .

Se completa la ecuación según diagrama de cuerpo libre de figura A4.2.

$$\sum F_Z = R_{AZ} - (25 * P_i) + R_{BZ} = 0$$

Se calcula el valor requerido

$$R_{BZ}[N] = (25 * P_i) - R_{AZ} = 153525 [N] \quad \text{[[ec. 4.12]]}$$

4- Ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales para hallar  $R_{BX}$ .

$$\sum F_X[N] \rightarrow = 0$$

Donde:

$F_X[N]$  = Fuerzas horizontales, en N.

Sentido derecho positivo  $\rightarrow +$ .

Se completa la ecuación según diagrama de cuerpo libre de figura A4.2

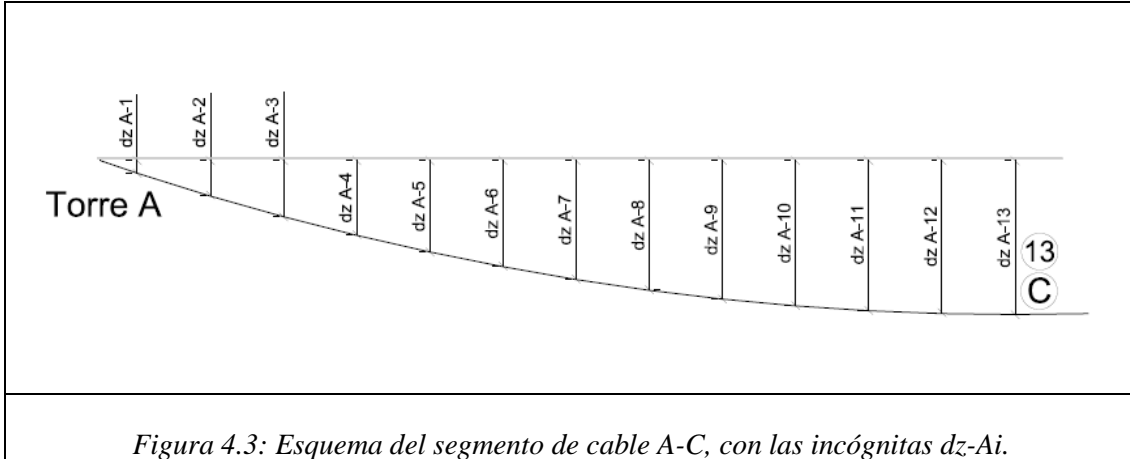
$$\sum F_X = -R_{AX} + R_{BX} = 0$$

Se calcula el valor requerido

$$R_{BX}[N] = R_{AX} = 457651 [N] \quad \text{[[ec. 4.13]]}$$

5- Ecuación de equilibrio de momentos sobre la sección izquierda en cada punto i para hallar cada valor de  $dz_{A-i}$

Una vez que se han determinado  $R_{AX}$  y  $R_{AZ}$  se calcula la distancia vertical desde A hasta cualquier punto del cable  $i$  ( $dz$  A-Pi). Realizando un corte en cada punto se trabaja con la sección izquierda y se calcula la sumatoria de momento estático, de esta manera se obtiene el valor  $dz$  en cada punto. Se indican las 13 nuevas incógnitas a calcular en la figura 4.3.



Se repite la operación en los 13 primeros puntos ya que la curva resultante será simétrica, pues la carga que tensiona los cables y origina la curva también lo es.

$$\sum M^1[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

$$(R_{AZ} * dx_{A-1}) - (R_{AX} * dz_{A-1}) = 0$$

$$dz_{A-1}[m] = \frac{(R_{AZ} * dx_{A-1})}{R_{AX}} = 1,48[m]$$

$$\sum M^2[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

$$(R_{AZ} * dx_{A-2}) - (R_{AX} * dz_{A-2}) - (P * d_{1-2}) = 0$$

$$dz_{A-2}[m] = \frac{(R_{AZ} * dx_{A-2}) - (P * d_{1-2})}{R_{AX}} = 4,19 [m]$$

$$\sum M^3[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

$$(R_{AZ} * dx_{A-3}) - (R_{AX} * dz_{A-3}) - (P * d_{1-3}) - (P * d_{2-3}) = 0$$

$$dz_{A-3}[m] = \frac{(R_{AZ} * dx_{A-3}) - (P * d_{1-3}) - (P * d_{2-3})}{R_{AX}} = 6,67 [m]$$

...

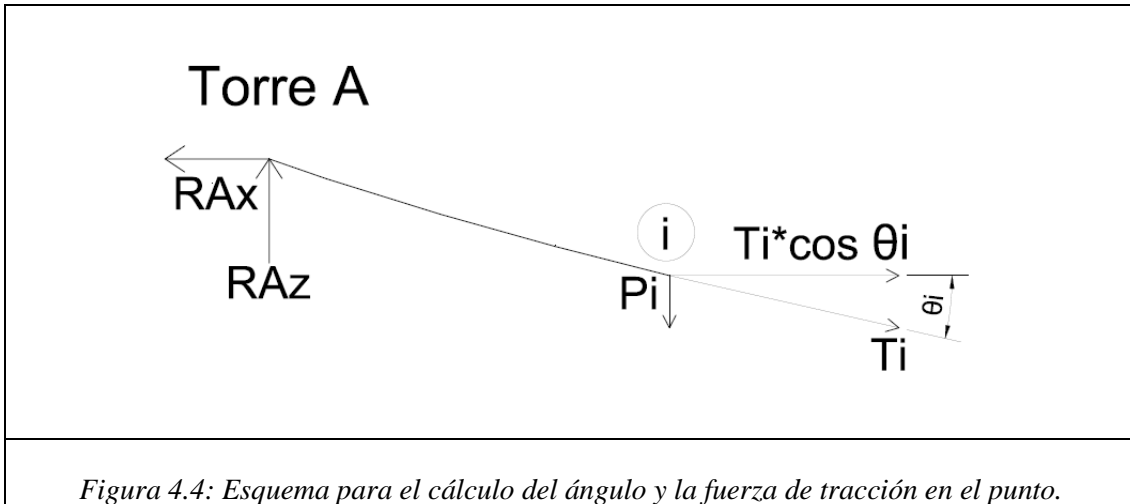
$$\sum M^i[N * m] \Rightarrow_+ = 0$$

$$(R_{AZ} * dx_{A-i}) - (R_{AX} * dz_{A-i}) - (P * d_{1-i}) - (P * d_{2-i}) - (P * d_{3-i}) - \dots - (P * d_{(i-1)-i}) = 0$$

$$dz_{A-i}[m] = \frac{(R_{AZ} * dx_{A-i}) - (P * d_{1-i}) - (P * d_{2-i}) - \dots - (P * d_{(i-1)-i})}{R_{AX}} \quad \text{[[ec. 4.14]]}$$

#### 6- Cálculo de pendiente en cada punto de carga

Una vez determinadas las reacciones (ec. 4.10, 4.11, 4.12, 4.13) y la posición de equilibrio de los puntos ( $dx_i$  -dato en figuras A4.1 y A4.2- y  $dzi$  -según ec. 4.14-) se procede con el cálculo de la pendiente en cada punto. En la figura 4.4 se indica el diagrama de cuerpo libre de la porción de cable utilizada para el cálculo de la pendiente y de la fuerza T que es conducida allí por el cable principal.



De las figuras A4.2, A4.3 y 4.4 se deduce que en cada punto:

$$\tan \theta_i = \frac{dz_{A-i}}{dx_{A-i}} \quad \text{[[ec. 4.15]]}$$

#### 7- Ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales para hallar Ti.

$$\begin{aligned} \sum F_X^1[N] \rightarrow &= 0 \\ -R_{AX} + T_1 * \cos \theta_1 &= 0 \\ T_1[N] &= \frac{R_{AX}}{\cos \theta_1} = 482715 [N] \\ \sum F_X^2[N] \rightarrow &= 0 \\ -R_{AX} + T_2 * \cos \theta_2 &= 0 \\ T_2[N] &= \frac{R_{AX}}{\cos \theta_2} = 480174 [N] \end{aligned}$$



$$\sum F_X^3[N] \rightarrow = 0$$

$$-R_{AX} + T_3 * \cos \theta_3 = 0$$

$$T_3[N] = \frac{R_{AX}}{\cos \theta_3} = 478232 [N]$$

...

$$\sum F_X^i[N] \rightarrow = 0$$

$$-R_{AX} + T_i * \cos \theta_i = 0$$

$$T_i[N] = \frac{R_{AX}}{\cos \theta_i} \quad \text{[[ec. 4.16]]}$$

Las ec. 4.14, 4.15 y 4.16 se resuelven para todos los valores de \*dzi, \*θi y \*Ti hasta i=13 y se presentan en la tabla 4.7. Se ha optado por considerar la sección, desde el apoyo A hasta el punto C siendo las restantes simétricas respecto de la péndola 13.

	Progresiva: en modelo teórico - dx	Progresiva: en sist. de ref. global - dx	*altura dz: modelo teórico	*ángulo θ: modelo teórico	*Fuerza T: modelo teórico
Punto	[m]	[m]	[m]	[°]	[N]
Apoyo A	0	57,29	0,00	0,0	-
1	4,4	61,69	1,48	18,5	482715
2	13,2	70,49	4,19	17,6	480174
3	22	79,29	6,67	16,9	478232
4	30,8	88,09	8,92	16,1	476437
5	39,6	96,89	10,92	15,4	474741
6	48,4	105,69	12,69	14,7	473129
7	57,2	114,49	14,23	14,0	471598
8	66	123,29	15,53	13,2	470146
9	74,8	132,09	16,59	12,5	468773
10	83,6	140,89	17,42	11,8	467478
11	92,4	149,69	18,01	11,0	466261
12	101,2	158,49	18,36	10,3	465123
Punto C-13	110	167,29	18,48	9,5	464064

Tabla 4.7: Resultados de posición de equilibrio, pendiente y fuerza T.

De la ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales ec. 4.16 y de los valores indicados en tabla la 4.7 se deduce lo siguiente: la componente horizontal de la fuerza es la misma en cualquier punto del cable ( $R_{AX} = R_{BX}$ ). En consecuencia, la fuerza de tracción que solicita el cable, T, es máxima cuando el  $\cos \theta$  es mínimo, esto es, en la porción del cable que tiene mayor ángulo de inclinación  $\theta$ . Dicha porción del cable es la adyacente a los

apoyos del extremo (cerca de cada torre). Así mismo, el mínimo valor de T se ubica en el punto medio del cable C (péndola 13).

#### 4.3.5 Análisis de la posición de equilibrio teórica.

En la figura 4.5 se grafican los puntos obtenidos del cálculo teórico e indicados en la tabla 4.7 en coordenada global y se comparan con los puntos de posición obtenidos de los planos (indicados en la figura 2.20). Se observa que la posición de equilibrio teórica del cable principal es prácticamente coincidente con la curva registrada en la documentación gráfica.

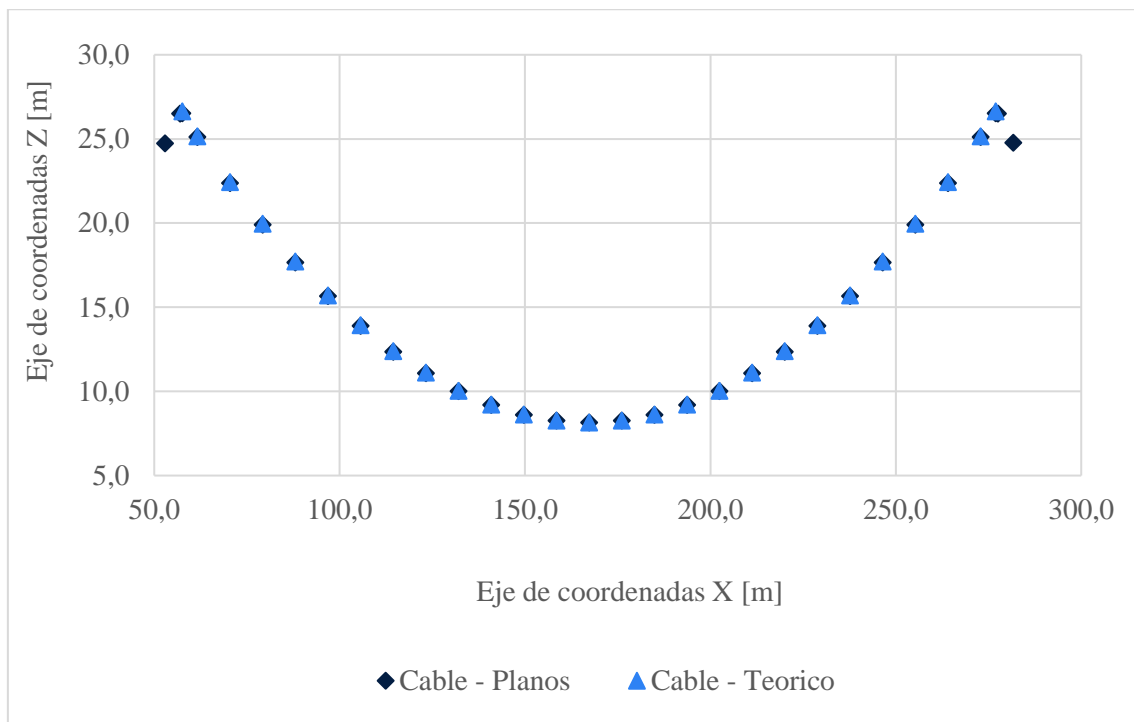


Figura 4.5: Comparación de posición entre coordenadas teóricas y coordenadas de planos, en el cable principal.

#### 4.3.6 Análisis de esfuerzos teóricos.

Respecto de las péndolas tal y como indica la ec.4.9, la fuerza que las solicita y el promedio  $P_i = \bar{P}_i = 12282$  (1,22 Tn) es similar al promedio de fuerzas que las solicitan según el resultado de los ensayos dinámicos  $\bar{P}_{i-2000} = 12511$  (1,25 Tn) y  $\bar{P}_{i-2014} = 12637$  (1,26 Tn) – de tabla 2.6 -.

Considerando que para el cable principal la posición del modelo teórico coincide con la posición de los planos y que para las péndolas el promedio de esfuerzo teórico coincide con el promedio del resultado de las mediciones dinámicas, se asume como esfuerzo solicitante del cable principal el valor del modelo teórico indicado en la tabla 4.7. A

continuación y en tabla 4.8 se indican los valores que solicitan el cable principal en todos los puntos y que serán un soporte fundamental para la validación del modelo de elementos finitos del próximo capítulo.

	Fuerza T: modelo teórico. Cable ppal.
Punto	[N]
Apoyos A-B	-
1-25	482715
2-24	480174
3-23	478232
4-22	476437
5-21	474741
6-20	473129
7-19	471598
8-18	470146
9-17	468773
10-16	467478
11-15	466261
12-14	465123
Punto C-13	464064

*Tabla 4.8: Resultados del modelo teórico en el cálculo del esfuerzo en el cable principal.*

#### 4.4 CONCLUSIÓN.

En la primera sección del Capítulo y por sustento de normativas y fabricantes se completó la información requerida para la correcta caracterización de los elementos estructurales, a los datos indicados en antecedentes se incorporan secciones, resistencias, Modulo de Young y densidad.

Luego, mediante el modelo teórico de un cable colgante se obtuvieron y compararon los valores que describen la condición estática de la estructura; esfuerzos en cables y posición de equilibrio. La posición teórica de equilibrio coincide con las coordenadas registradas en los planos. La sollicitación en péndolas coincide con el promedio de las sollicitaciones registradas durante las campañas de ensayos dinámicos. Finalmente, y en consecuencia de las verificaciones mencionadas anteriormente, se asume que los esfuerzos teóricos calculados en la trayectoria del cable principal son los valores que este registró en el período de la puesta en servicio (es decir, valores de diseño).

## 5 CAPÍTULO: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – MEF.

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN.

El presente Capítulo describe el diseño del modelo de elementos finitos (MEF) e indica los fundamentos utilizados para su confección. El objetivo del Capítulo es elaborar un modelo que logre reproducir correctamente el estado de desplazamientos y tensiones actual del sistema estructural. El sistema estructural por modelar se compone de torres metálicas de gran altura, cables metálicos de distintos tamaño y configuración, un ducto de gran longitud y pequeños y variados dispositivos de unión. La complejidad de cada componente, su representación y las opciones/limitaciones que tiene el software requieren que la formulación del modelo incluya ciertas consideraciones especiales. Es importante el análisis y selección del elemento adecuado para representar según lo permita el software, de la mejor manera posible, los materiales y su comportamiento.

Se seleccionaron elementos tipo viga con seis grados de libertad para representar las torres y el ducto y elementos tipo barra con tres grados de libertad, de dos y tres nodos para representar los cables. Se mencionan las consideraciones especiales que se incluyeron en el modelo y que luego serán explicadas con suficiente detalle:

- Definir un tipo de elemento especial denominado conector, que cumple con la función de compatibilizar la unión de los elementos con distintos grados de libertad; elemento viga y elemento barra.
- Incorporar nodos adicionales en la malla del modelo para definir estos nuevos elementos conectores.
- La librería del software no cuenta con elementos tipo cables que representen el comportamiento de éstos, motivo por el cual se adoptó elementos de barra simple, pero en la asignación del material se incluyó la opción de “no compresión” de manera tal que el material solo reaccione ante esfuerzos de tracción, siendo esta la mejor opción para su representación.

Las secciones del software que se utilizaron comprenden en primera instancia un archivo de texto donde se ingresan los datos para confeccionar la malla, las propiedades y restricciones del modelo, luego y en segunda instancia una interfaz gráfica que permite visualizar y extraer los resultados. El capítulo se ordena siguiendo la secuencia utilizada

en el software, que comprende: mallado de la geometría, asignación de elementos, asignación de secciones, asignación de materiales, definición de las condiciones de borde, definición de las condiciones iniciales, asignación de cargas y por último resultados-postproceso. El desarrollo del Capítulo se sustenta en el libro [18], manual de Abaqus [19] y el documento de introducción al software [20].

## **5.2 MALLADO DE LA GEOMETRÍA.**

La malla del modelo se compone de elementos que se conectan entre sí por nodos. En la sección 2.2.1 se describe la geometría de la estructura presentando las coordenadas de los nodos y los segmentos que representan cada elemento. En base a esto se confecciona la malla del modelo y en las figuras A5.1 y A5.2 (ver Anexos) se muestran los nodos y elementos resultantes del proceso. La malla del modelo contiene 155 nodos con los cuales se definen 187 elementos. Es importante destacar que cada segmento representado en la gráfica de la malla corresponde con el eje baricentrico de cada elemento. Es decir, por ejemplo, los segmentos que en las imágenes A5.1 y A5.2 (ver Anexos) describen la trayectoria del ducto representan la ubicación del eje baricentrico del ducto → eje del ducto = eje baricentrico del elemento viga (beam), lo mismo cabe para los demás elementos.

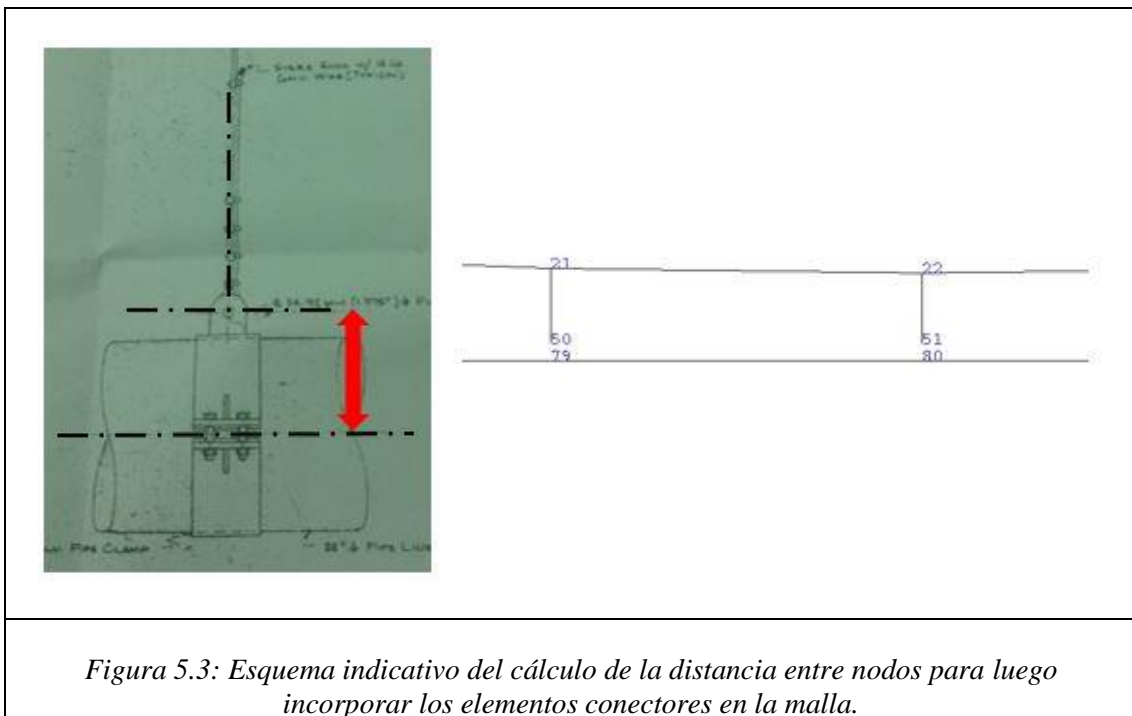
### **5.2.1 Inclusión de nodos para elementos conectores**

La etapa de discretización del dominio constituye una parte esencial en la fase de pre-proceso, del análisis del caso surge la necesidad de añadir elementos conectores para los cuales primeramente deben definirse sus nodos vinculantes e incorporarlos consistentemente en la malla.

La inclusión del elemento conector permite compatibilizar los desplazamientos del ducto (viga/beam) y del cable (truss/barra). Como el cable no tiene rigidez apreciable a flexión, se asume que es cero (en comparación con la rigidez a flexión de la viga) y “los giros” son solo para los elementos viga y no para los elementos de barra. Un elemento viga en el espacio posee 3 desplazamientos y 3 giros como grados de libertad mientras los elementos de barra solo tienen 3 desplazamientos. En la siguiente sección “Elementos” se profundiza sobre los tipos de elementos y la compatibilidad. En esta sección se indica cómo se resolvió la incorporación de estos nuevos elementos conectores en la malla.

Los detalles ampliados en las figuras A5.1 y A5.2 (ver Anexos) muestran sectores de la malla donde se proyectan los nodos que definen el espacio de los elementos conectores.

En la imagen que se encuentra abajo, figura 5.3, se muestran los espacios vacíos (próximos a ser ocupados por conectores) de la malla entre elementos que definen una sección del ducto y elementos que definen las péndolas. Tal y como se indica en la figura 5.3 la distancia “vacía” entre el final de la péndola y el eje del ducto es igual al radio del ducto más la distancia desde la superficie del ducto al centro del ojo de la abrazadera donde se enlaza la péndola, ese espacio será “ocupado” en el modelo por el elemento conector. Los conectores, al igual que los otros elementos también se ubican en los ejes baricéntricos de cada sección. De esta manera se resuelve la incorporación de los elementos conectores en la malla.



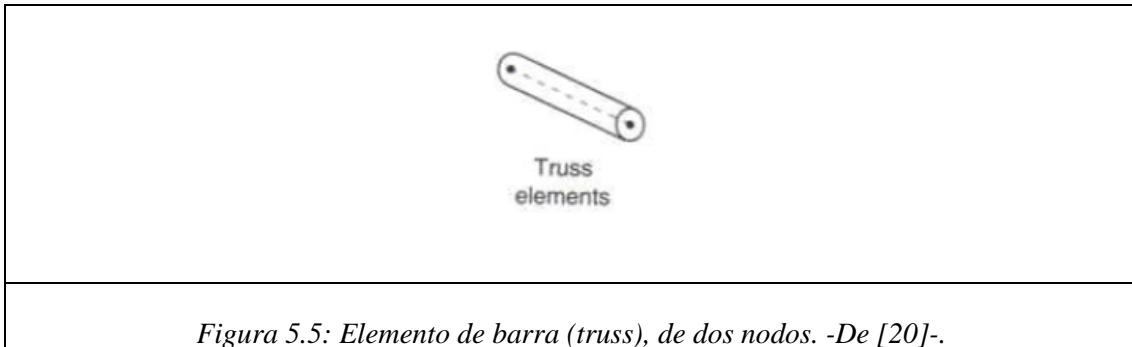
### 5.3 ELEMENTOS.

El modelo requiere que la malla de elementos finitos se constituya por elementos de diferente tipo y geometría, esto supone verificar sus compatibilidades, lo que implica que los movimientos característicos del problema, tales como desplazamiento deben ser continuos entre elementos. La figura A5.4 (ver Anexos) muestra los distintos tipos de elementos que representan el modelo y que se describen a continuación.

#### 5.3.1 Elementos de barra

Elementos de barra (truss): estos elementos solo pueden transportar carga actuante en dirección perpendicular a la sección transversal, cuyo esquema se representa en la figura 5.5. Tal y como lo indican las tablas 5.1 y 5.2 poseen 3 grados de libertad por cada nodo.

Modelan el comportamiento de barras, aplicables dentro del sistema estructural analizado a todos los cables. Dado que los cables solo admiten esfuerzos de tracción, únicamente se desplazarán en dirección de la fuerza que les solicita. Es decir, prácticamente se comportan como una barra que sólo se encuentra solicitada a tracción.



*Figura 5.5: Elemento de barra (truss), de dos nodos. -De [20]-.*

Péndolas y Cables de viento: interpolación lineal.

La configuración geométrica de las péndolas es lineal, es decir, las péndolas se ajustan en su extremo superior al cable principal y en su extremo inferior al gasoducto, describiendo una trayectoria vertical. Por lo tanto, los elementos tipo barra de dos nodos representan adecuadamente su comportamiento.

Si bien los cables de viento no son rectos en su posición normal de equilibrio, los elementos tipo barra de dos nodos representan adecuadamente el comportamiento de estos. Ajustando un extremo al brazo de la torre y el otro extremo al ducto, se asume una trayectoria recta.

- T3D2: T (truss) – 3D (tres dimensiones) – 2 (número de nodos y tipo de interpolación).

Elemento estructural	Elemento finito
Péndola y Cable de viento	T3D2
Geometría	Interpolación
Lineal	Lineal
Desplazamiento de cada extremo	GL por nodo
3	3
Desplazamiento en x	(u1)
Desplazamiento en y	(u2)
Desplazamiento en z	(u3)

*Tabla 5.1: Características del elemento estructural y elemento finito seleccionado para su modelación – Péndola y Cable de viento.*

Cable principal: interpolación cuadrática.

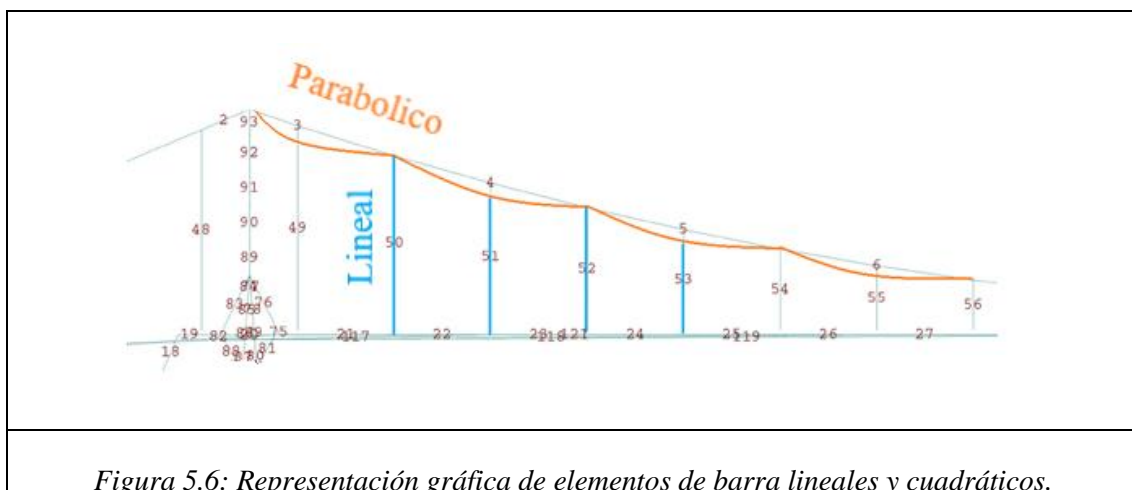
Tal y como se ha mostrado en gráficos anteriores la configuración geométrica del cable principal describe una trayectoria curva. Por lo tanto, para su representación se selecciona otro tipo de elemento de barra, elementos de barra con tres nodos e interpolación parabólica:

- T3D3: T (truss) – 3D (tres dimensiones) – 3 (número de nodos y tipo de interpolación).

Elemento estructural	Elemento finito
Cable principal	T3D3
Geometría	Interpolación
Parábola	Cuadrática
Desplazamiento de cada morceto	GL por nodo
3	3
Desplazamiento en x	(u1)
Desplazamiento en y	(u2)
Desplazamiento en z	(u3)

*Tabla 5.2: Características del elemento estructural y elemento finito seleccionado para su modelación – Cable principal.*

En función del número de nodos y orden de interpolación se ha optado por seleccionar dos tipos de elemento barra para modelar todos los cables del sistema. El orden de interpolación es determinado por el número de nodos usados en el elemento. Los elementos lineales tienen nodos solo en los extremos y utilizan funciones de interpolación lineal. Los elementos cuadráticos poseen además un nodo intermedio y utilizan funciones con interpolación cuadrática. A continuación, en la figura 5.6 se muestra una sección de la malla donde se grafican los elementos de barra lineales definidos para modelar las péndolas y los cuadráticos definidos para modelar el cable principal.



*Figura 5.6: Representación gráfica de elementos de barra lineales y cuadráticos.*



### 5.3.2 Elementos de viga.

Elementos de viga (beam): como su nombre lo indica y se muestra en la figura 5.7 modelan el comportamiento de vigas, elementos que poseen rigidez a flexión y por lo cual admiten giros y solicitaciones de momento flector. De esto se deduce que poseen 6 grados de libertad por cada nodo, indicados en tabla 5.3, además de los desplazamientos incluyen los giros. Aplicables dentro del sistema estructural analizado a las torres y el ducto, quienes aportan la mayor rigidez al sistema estructural.

Tal y como menciona [18], las teorías de vigas más utilizadas para modelar vigas son la Euler-Bernoulli y la de Timoshenko. La primera es adecuada para vigas esbeltas (alto  $\ll$  largo del orden de 300, aplicable a este modelo) mientras que la viga Timoshenko es adecuada para modelos donde el alto comienza a ser importante respecto del largo y los giros ya no se pueden aproximar adecuadamente como la pendiente de la flecha.

Para modelar el ducto y las torres se adoptan vigas del tipo Euler-Bernoulli. Esto se fundamenta en las hipótesis de su formulación: los desplazamientos verticales de todos los puntos de la sección transversal son pequeños e iguales a los del eje de la viga. Las secciones transversales normales al eje de la viga antes de la deformación, permanecen planas y ortogonales a dicho eje después de la deformación.

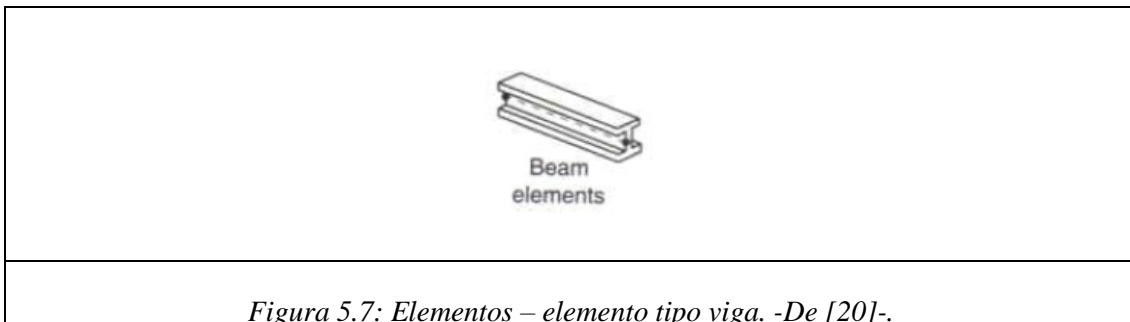


Figura 5.7: Elementos – elemento tipo viga. -De [20]-.

#### Tubería y Torres:

La tubería constituye el elemento estructural foco del análisis, por lo tanto, es primordial modelar con la mayor exactitud posible las condiciones actuales de la misma. En la etapa actual ésta describe una deformada asociada a vigas con condiciones de empotramiento-empotramiento en sus extremos. Como lo muestra el gráfico 2.22 de la sección 2.3 los extremos se desplazan hacia arriba y el centro hacia abajo respecto de la posición de referencia (sin carga).

Las torres constituyen los elementos estructurales que soportan el sistema de cables que sostiene el ducto. En la etapa actual éstas describen una deformada asociada a vigas con condiciones de empotramiento-libre en sus extremos.

- B33: Viga de Euler-Bernoulli.

Estas vigas presentan propiedades aptas solo para modelar vigas esbeltas, donde las dimensiones de la sección transversal son pequeñas comparadas con largo de su eje.

Elemento estructural	Elemento finito
Tubería y Torres	B33
Geometría	Interpolación
Deformada de una viga empotrada-empotrada y empotrada-libre	Cuadrática
Desplazamiento de nudo	GL por nudo
6	6
Desplazamiento en x	(u1)
Desplazamiento en y	(u2)
Desplazamiento en z	(u3)
Rotación alrededor del eje x	(ur1)
Rotación alrededor del eje y	(ur2)
Rotación alrededor del eje z	(ur3)

*Tabla 5.3: Características del elemento estructural y elemento finito seleccionado para su modelación –Tubería y Torres.*

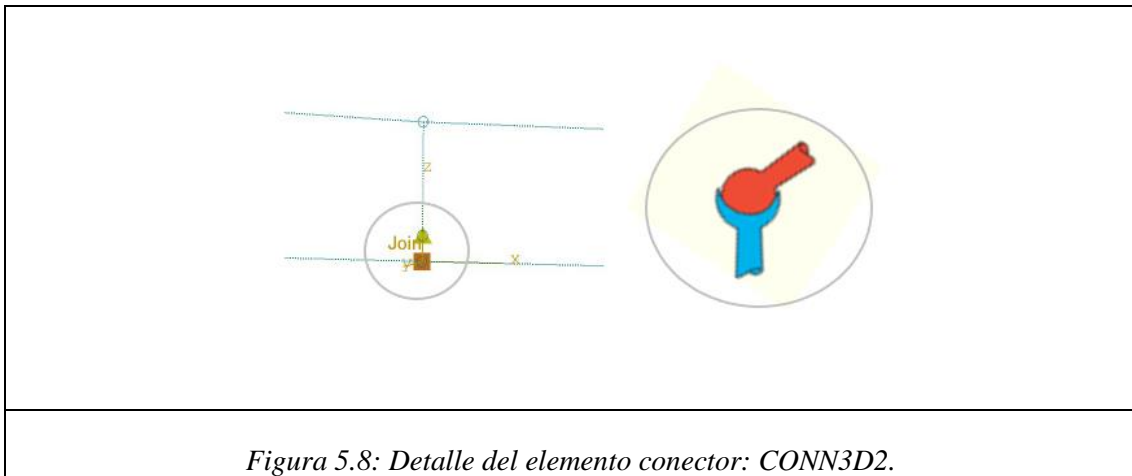
### 5.3.3 Elementos conectores.

Durante la confección de la malla de elementos se detecta la incompatibilidad en campos de desplazamientos y giros (grados de libertad) entre dos elementos distintos. Si comparamos las tablas 5.1, 5.2 correspondiente a elementos tipo barra y la tabla 5.3 correspondiente a elementos tipo viga, se observa que los nodos de barras poseen 3 grados de libertad y los nodos de viga 6. Naturalmente la incompatibilidad se presenta en aquellos nodos que vinculan un elemento de barra con un elemento de viga (cables con ducto y torres), ya que la principal distinción entre estos es que los primeros se han considerado sin rigidez a flexión y los últimos presentan rigidez a flexión. Es decir, los desplazamientos del nodo para ambos elementos son coincidentes pero los elementos barra no tienen resistencia a flexión y entonces no comparten con el elemento viga los giros.

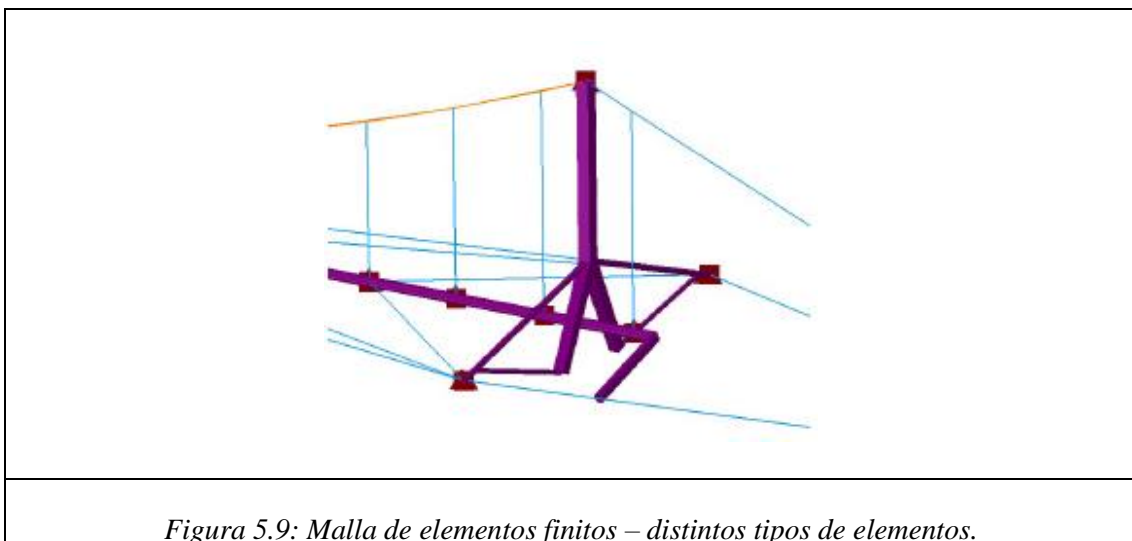
En el sistema estructural, el ducto admite esfuerzos de flexión, pero las péndolas solo tracción, en el modelo se salva la incompatibilidad adicionando elementos que coordinen los grados de libertad y por lo tanto representen con la mayor fidelidad posible la realidad física de la unión.

Si se retoma el análisis de la unión, presentado en la sección 2.2.3, se deduce que el dispositivo formado por las cartelas soldadas y el cojinete donde se enhebra la péndola

funciona como una rótula/articulación. En función de esto se selecciona un elemento conector que represente este fenómeno, se lo muestra en la figura 5.8. El elemento conector es rígido, no se deforma.



De esta manera se salva la incompatibilidad incluyendo un elemento de dos nodos (conector) por cada nodo unión barra – viga, con grados de libertad distintos en cada extremo; uno compatible con elementos de barra y en otro compatible con elementos de viga. Es decir, el centro de la rótula es un punto fijo donde se compatibilizan los desplazamientos. Finalmente, en la figura 5.9 se muestra un detalle de la malla de elementos finitos con los distintos elementos que se han considerado para modelar cada parte del sistema estructural. En color violeta se muestran los elementos tipo viga seleccionados para el ducto y las torres, en color celeste todos los elementos de barra lineales que se seleccionaron para las péndolas y cables de viento, en color naranja los elementos de barra cuadráticos para el cable principal y por último se grafican en color bordo los elementos conectores.

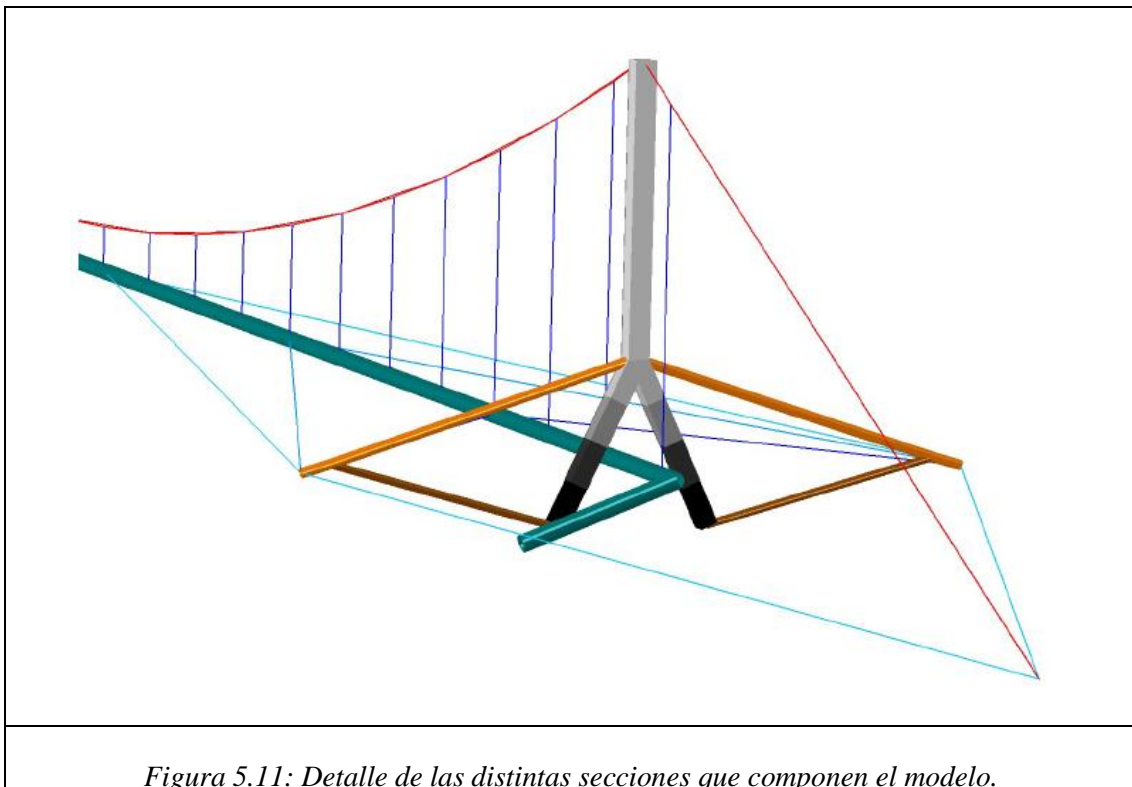


#### 5.4 SECCIONES.

Una vez confeccionada la malla y asignados los tipos de elementos, al modelo deben incluirse las geometrías de las secciones. La figura A5.10 (ver Anexos) muestra todas las secciones que componen el modelo.

Los elementos de viga que modelan el ducto incluyen la sección representada por un anillo circular de radio y espesor constante. Los elementos de viga que modelan las torres incluyen secciones representadas por distintos rectángulos huecos de ancho, profundidad y espesor constante para el cuerpo y pies/apoyos y un anillo circular de radio y espesor constante para los brazos/botavaras de las torres. Los elementos de barra que modelan los cables (todos) incluyen secciones circulares macizas constantes cuyo valor es el provisto por el fabricante para cada diámetro nominal.

En la figura 5.11 se muestra un detalle ampliado de la figura A5.10, donde se representa con distintos colores las diferentes geometrías que modelan las secciones.



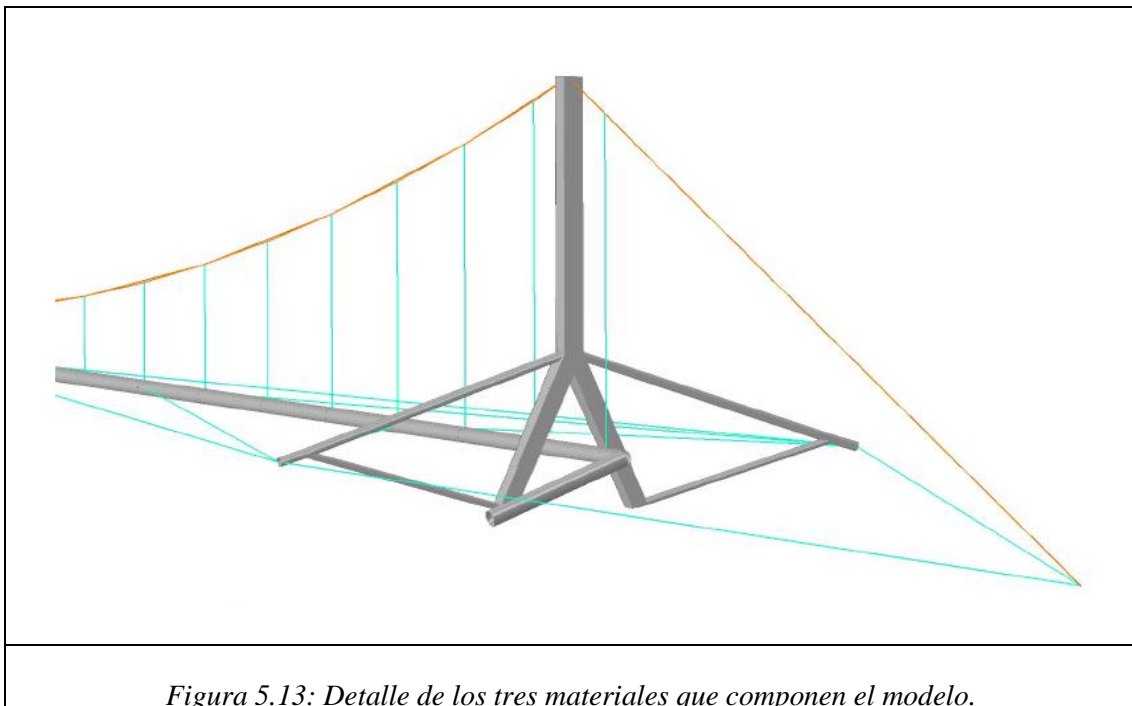
#### 5.5 MATERIALES.

Si bien los elementos de barra transportan carga actuante en dirección perpendicular a su sección transversal, para el caso de los cables esa carga solo puede conducir fuerzas que lo traccionen ya que se asume que éste no puede conducir ninguna fuerza que lo comprima

(se dobla). Si lo consideramos como un resorte que solo ofrece resistencia cuando la fuerza aplicada tiende a estirarlo, según;  $Fuerza = K(u_f - u_i)/L_i$ ,  $K = E \cdot A$ ,  $E = \text{módulo de elasticidad longitudinal}$ ,  $A = \text{área de la sección transversal del cable}$ . Para que esto suceda hay que adoptar un modelo constitutivo que solo permita tracción. Es decir, si las fuerzas traccionan el cable éste cuenta con su rigidez  $K$  y si la sollicitación comprime el cable entonces para esa condición  $K=0$ . La mejor opción de representar esto es indicarle al programa que el comportamiento del material asignado a los elementos que modelan el cable no admite compresión. Esta consideración especial aplicada sobre el material que modela el comportamiento de los cables garantiza su correcta representación.

Además de la consideración especial indicada arriba, se ingresan los parámetros de los distintos materiales que conforman la estructura, particularmente el módulo de elasticidad longitudinal (módulo de Young) y densidad de cada uno, indicados en sección 4.2.

La figura A5.12 (ver Anexos) muestra la malla completa con los materiales asignados al modelo y la figura 5.13 es un detalle ampliado para la correcta visualización de los tres materiales que conforman el modelo: acero al carbono convencional en torres y ducto, alambres de acero torcidos helicoidales simples que conforman un torón (sin compresión) para el cable principal y alambres de acero distribuidos en seis torones trenzados en sentido helicoidal alrededor de un torón central (sin compresión) para péndolas y cables de viento.



## 5.6 CONDICIONES DE BORDE.

Las condiciones de borde representan las restricciones al movimiento que imponen los vínculos externos del sistema estructural. En la sección 2.2.4 se indicó que el sistema posee apoyos de dos tipos: apoyo fijo y empotramiento. El primer tipo impide todo tipo de desplazamiento y el segundo impide desplazamientos y giros. Para modelar esto se seleccionan dos grupos de restricciones a colocar en los nodos correspondientes. En la figura A5.14 (ver Anexos) se muestra la malla de elementos con los ocho puntos de vinculación donde se registran las condiciones de borde mencionadas arriba. Luego, en la figura 5.15 se presenta un detalle para su correcta distinción.

Las restricciones del apoyo fijo, en tabla 5.4, se ubican en los anclajes. Son los puntos externos donde se vinculan el cable principal y los cables de viento con el bloque de hormigón. Vinculación externa que en la figura 5.15 se indica en color naranja.

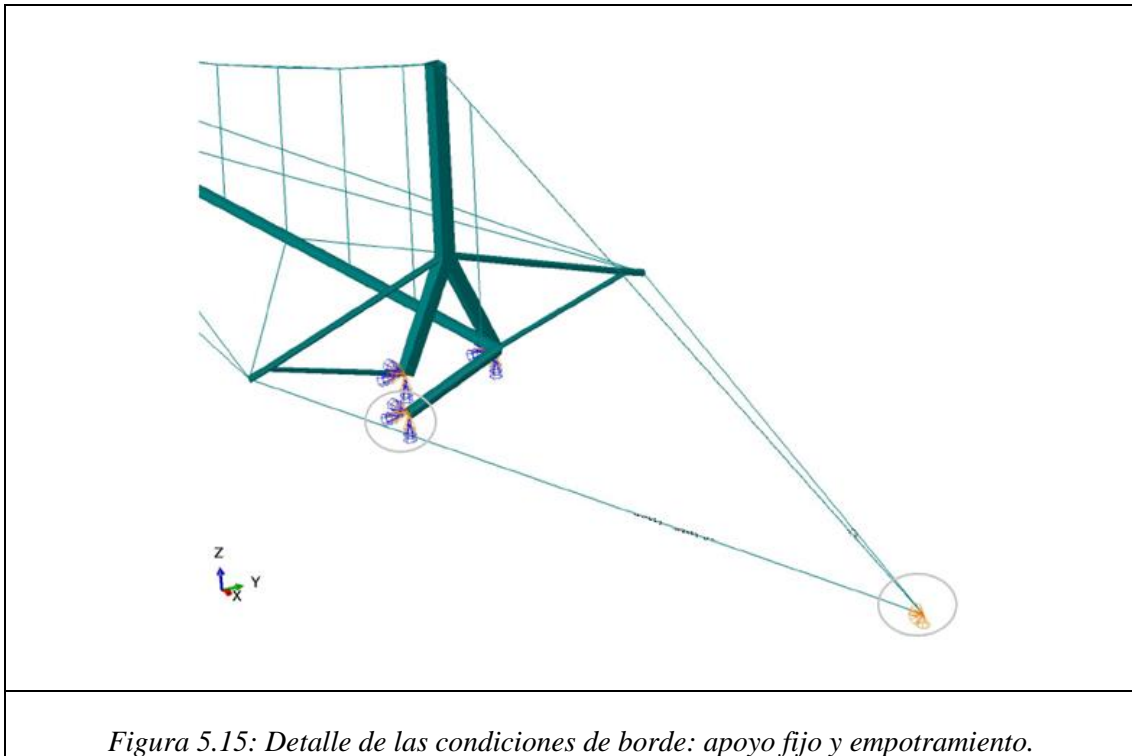
Vinculación externa	BC
Apoyo fijo	Pinned
Restricciones	Restricciones
3	3
Desplazamiento en x	(u1)
Desplazamiento en y	(u2)
Desplazamiento en z	(u3)

*Tabla 5.4: Características del apoyo y condición de borde seleccionada para su representación – Apoyo fijo.*

Las restricciones del empotramiento, en tabla 5.5, se ubican en los extremos del ducto y en apoyos de torres. Vinculación externa que en la figura 5.15 se indica en color azul.

Vinculación externa	BC
Empotramiento	Encastre
Restricciones	Restricciones
6	6
Desplazamiento en x	(u1)
Desplazamiento en y	(u2)
Desplazamiento en z	(u3)
Rotación alrededor del eje x	(ur1)
Rotación alrededor del eje y	(ur2)
Rotación alrededor del eje z	(ur3)

*Tabla 5.5: Características del apoyo y condición de borde seleccionada para su representación – Empotramiento.*



## 5.7 CONDICIONES INICIALES.

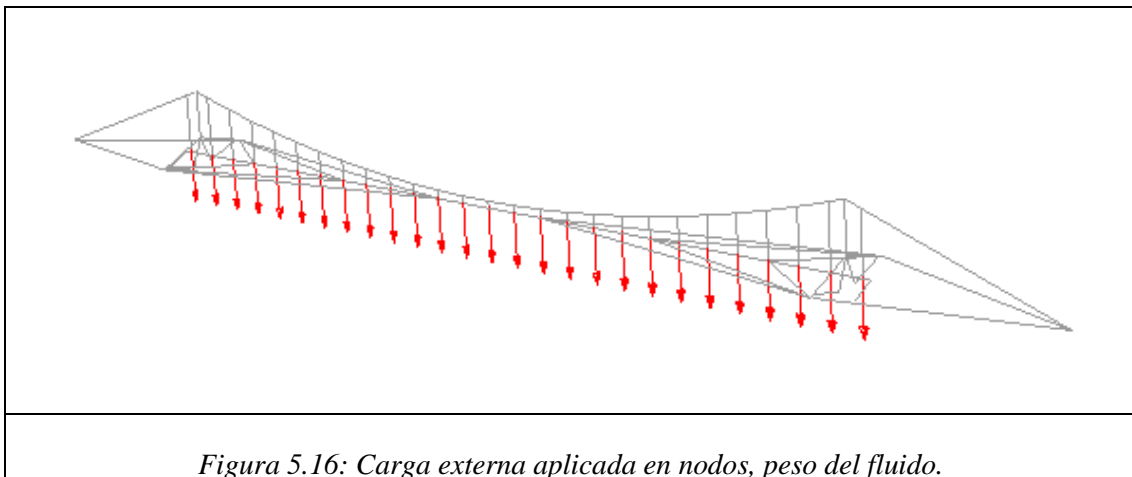
Para la correcta representación del estado actual del sistema estructural es necesario incluir tensiones iniciales en el cable principal y en péndolas. Es un requerimiento que se incluye para garantizar la estabilización en la forma de la curva que describe el cable principal.

Sobre el cable principal, las tensiones iniciales se calcularon iterando el modelo hasta hallar los valores que verifique la deformada actual y se asemejen a las tensiones teóricas de la tabla 4.8 calculadas en el Capítulo anterior. Con asemejar se interpreta que estás no pueden ser exactamente las mismas ya que las tensiones teóricas consideran una deformada teórica donde se supone que el ducto permanece en posición recta, lo cual no es lo registrado.

En las péndolas las tensiones iniciales se calcularon idénticamente a las del cable principal (iterando el modelo) hasta verificar la deformada real y luego se verificó que se asemejen a los valores de tensiones resultantes de las mediciones y teóricas, ambas indicadas en apartado 4.3.6.

## 5.8 CARGAS.

En este análisis, del tipo estático-lineal y que tiene por objetivo representar el estado actual de tensión y deformación en el sistema estructural, especialmente en el ducto, solo se consideran las cargas del tipo gravitatorias. Es decir, las sollicitaciones externas que se ejercen son según el eje Z y se corresponden con el peso propio de cada elemento y el peso del fluido. En figura 5.16 se muestran los vectores de Fuerza correspondiente a la carga aplicada en los nodos, cuyo valor es el peso del fluido, indicado en sección 4.3.2. No se incluyen factores de mayoración o combinaciones de carga en el análisis, ya que como se mencionó en el Capítulo 1 este proyecto solo considera factores de seguridad/penalizaciones sobre la resistencia.



## 5.9 RESULTADOS.

Una vez confeccionado el modelo e incluidas las consideraciones especiales se ejecuta el programa y a continuación se describen los resultados obtenidos. El objetivo del presente Capítulo es reproducir correctamente el estado actual de desplazamiento y tensiones de la estructura en estudio, y es justamente eso lo que se evalúa a continuación.

### 5.9.1 Resultado: Reacciones de vínculo.

Inicialmente y previo analizar y comparar los resultados de tensiones/desplazamientos que brinda el modelo es importante verificar las reacciones de vínculo en los apoyos. Se verifican ubicación, dirección y sentido de los vectores Fuerza y Momento, donde se asemejan al modelo teórico también se verifica magnitud.

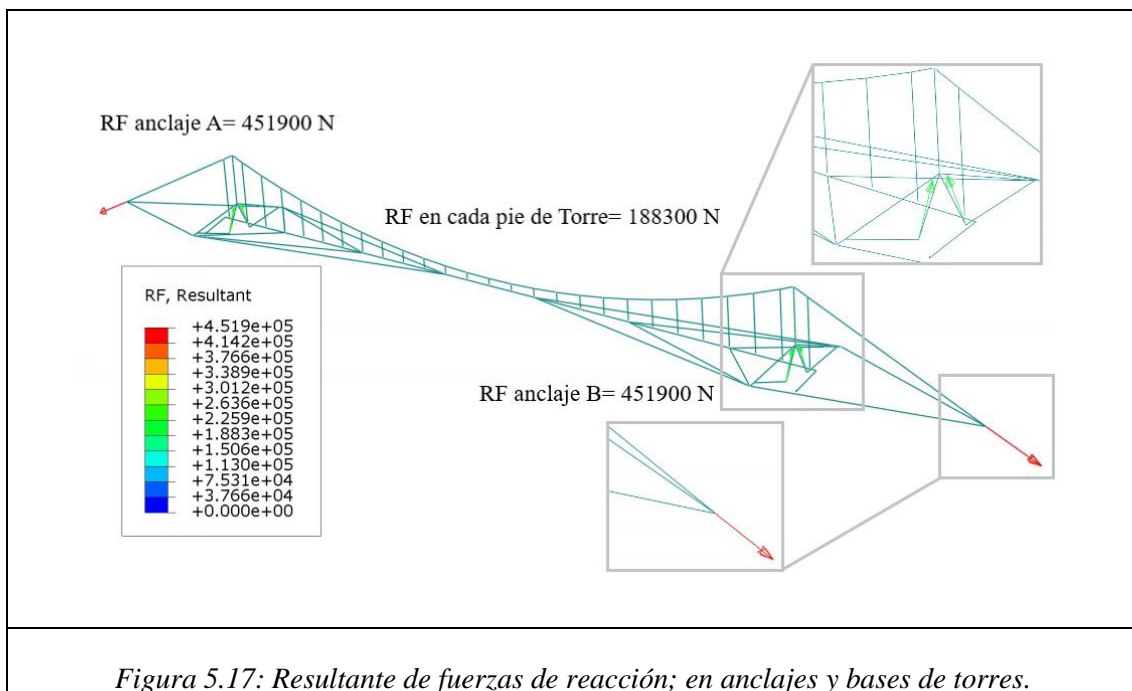
En la figura 5.17 se observa que la resultante de reacciones se ubica correctamente en los puntos donde se colocaron apoyos fijos o empotramientos. Dos reacciones en sentido



ascendente en el apoyo de cada torre contrarrestando la fuerza de gravedad del sistema. Luego, una reacción de sentido exterior en cada anclaje contrarrestando la tracción del cable que mantiene el sistema de cargas suspendido.

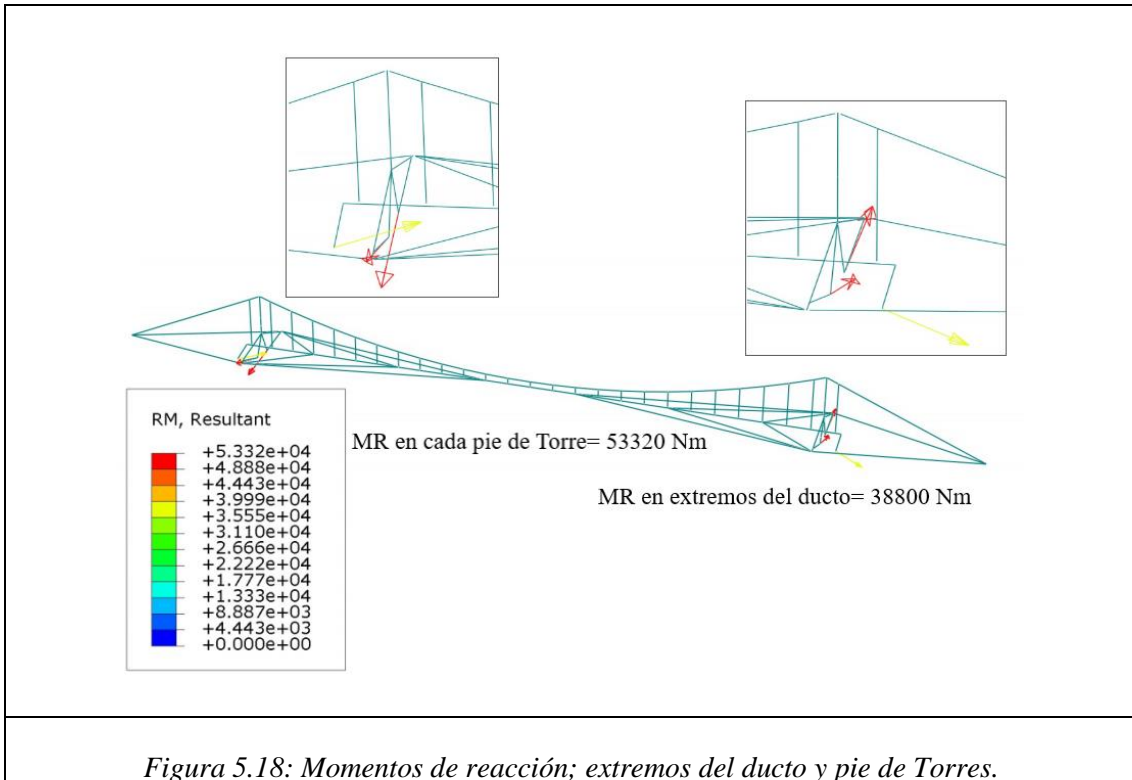
Las magnitudes resultantes del MEF en cada anclaje son RF A y B= 451900 N. Según el modelo teórico de la sección 4.3 la fuerza de tensión en el cable varía desde 464064 N en el punto más bajo a 482715 N en los puntos más altos. Se concluye que el modelo numérico reproduce correctamente el modelo teórico.

Las magnitudes resultantes en cada pie/apoyo de torre es RF en pie Torre=188300 N y en el modelo teórico de la sección 4.3 se calculó un valor de reacción de 153525 N en cada torre. Es importante considerar que el modelo teórico no incluye el peso de las torres, pero la simulación sí lo incluye. Suponiendo una sección uniforme de 0,75m x 0,75m, de 8mm de espesor y de 26m de altura da un valor de peso 24002 N, que si se multiplica por 1,5 para considerar los brazos de las torres da un valor total de peso de torre de 36003 N → que es aproximadamente la diferencia entre la simulación y el modelo teórico.



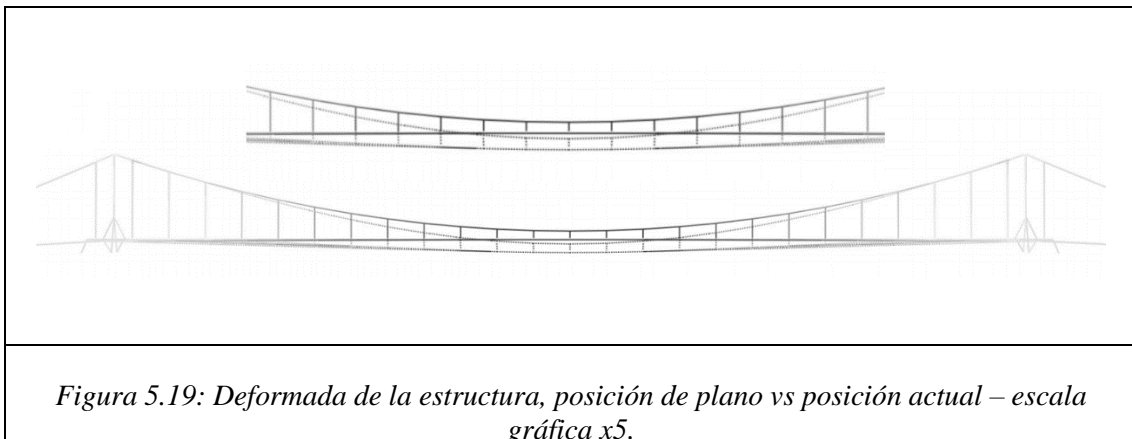
En la figura 5.18 se presentan los momentos, ubicados correctamente en los puntos donde hay empotramientos. Dos momentos en el apoyo de cada torre contrarrestando la inercia al giro de esas vinculaciones y luego, un momento en cada ingreso del ducto al subsuelo, contrarrestando nuevamente la inercia a flexión del ducto. Las magnitudes son en el ducto MR en ducto= 38800 N.m y para las Torres MR en pie =53320 N.m. Lo expuesto aquí es

un buen indicio de que el modelo de elementos finitos reproduce correctamente los efectos de las solicitaciones en el sistema estructural.



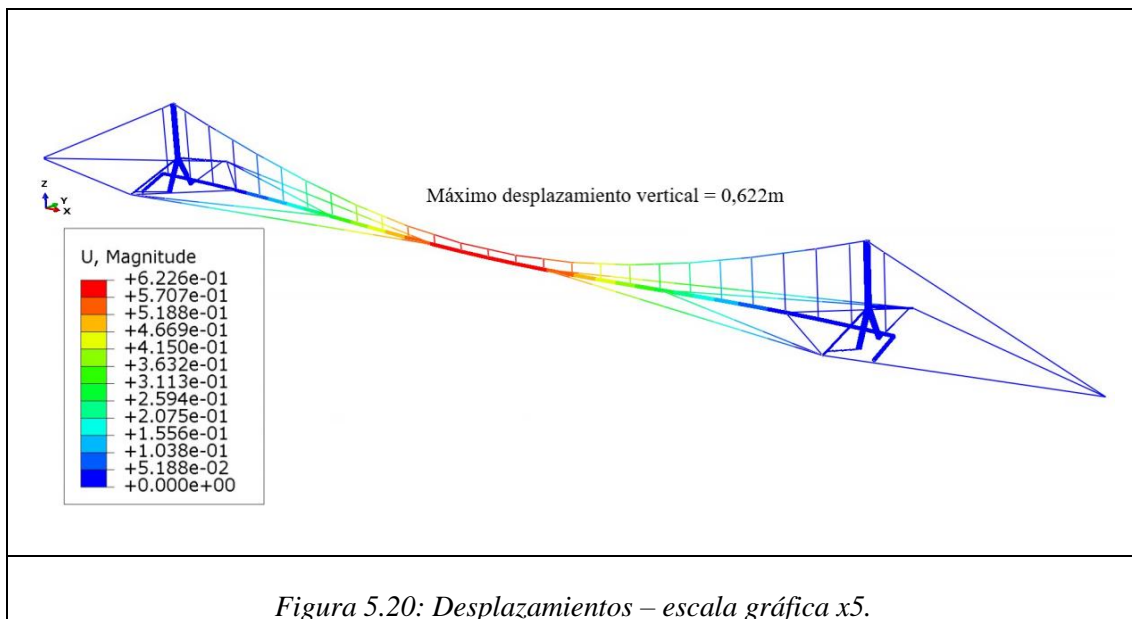
### 5.9.2 Resultado: Deformada de la estructura.

Además de las reacciones es importante verificar la consistencia de la deformada de la malla bajo las condiciones de borde y estados de carga impuestos. Debido a que para el análisis se han considerado únicamente cargas verticales, es de esperar que la deformada principal sea la resultante de desplazamientos verticales. Abajo, en la figura 5.19 se observa que la deformada es consistente con el estado de cargas y con el tipo de vinculación también, ya que las magnitudes más altas se ubican en el centro y según dirección gravitatoria, z.



### 5.9.3 Resultado: Desplazamientos.

La malla debe reproducir los desplazamientos que actualmente registran el ducto y cable principal. En la figura 5.20 se observa la malla deformada y señalizada según la magnitud de los desplazamientos, desde el color azul hasta el rojo se muestra las zonas con menor y mayor desplazamiento respectivamente. El mayor desplazamiento se ubica en la zona central de la estructura. La magnitud indicada es  $u=u_3$ , desplazamiento resultante = desplazamiento vertical. De la tabla donde se indica la magnitud observa que el mayor desplazamiento se corresponde con 0,62 m en zonas del cable principal y el ducto.



A continuación, se grafican y comparan los desplazamientos de la malla obtenidos mediante el modelo numérico y los desplazamientos registrados en el relevamiento geométrico. En figura 5.21 se representan los correspondientes al cable principal.

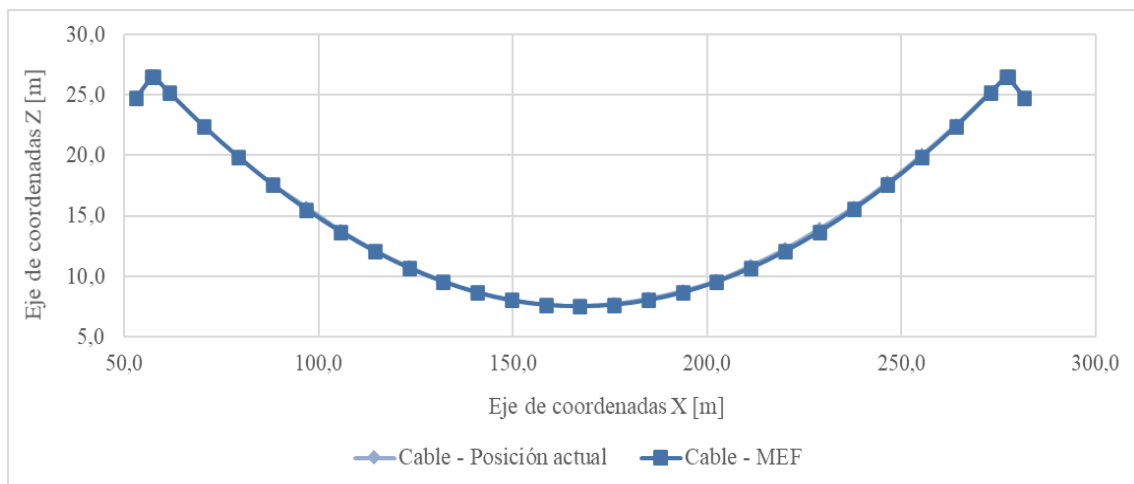


Figura 5.21: Comparación de desplazamientos en cable principal.

En figura 5.22 se representan los correspondientes al ducto

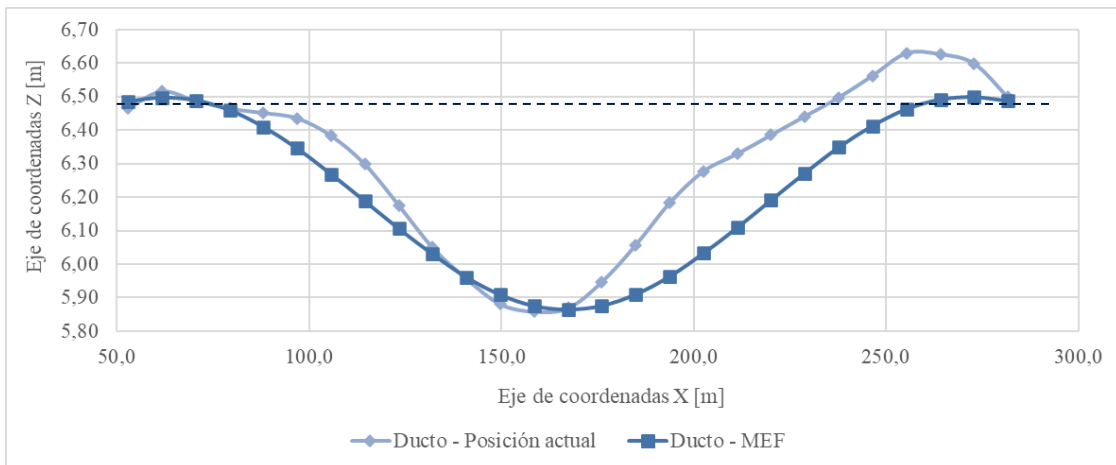


Figura 5.22: Comparación de desplazamientos en el ducto.

De las figuras 5.21 y 5.22 se observa y concluye que el modelo reproduce correctamente los desplazamientos registrados en el cable principal y aproxima razonablemente los registrados en el ducto.

#### 5.9.4 Resultado: Tensiones.

Se comparan los resultados de tensiones en los elementos de la malla con los valores de tensión teórica en el cable principal y luego se comparan con los valores obtenidos de los ensayos dinámicos y teóricos en las péndolas.

En tabla 5.6 se presenta la comparación de las tensiones en distintas secciones del cable principal (ver figura 5.23). Se observa que la tensión teórica calculada en Capítulo 4 y la tensión reproducida por la malla de elementos finitos coinciden en el orden, distribución y numéricamente distan hasta 10%. Esto es un resultado muy favorable e indica que el modelo numérico reproduce consistentemente las tensiones actuales en el cable principal.

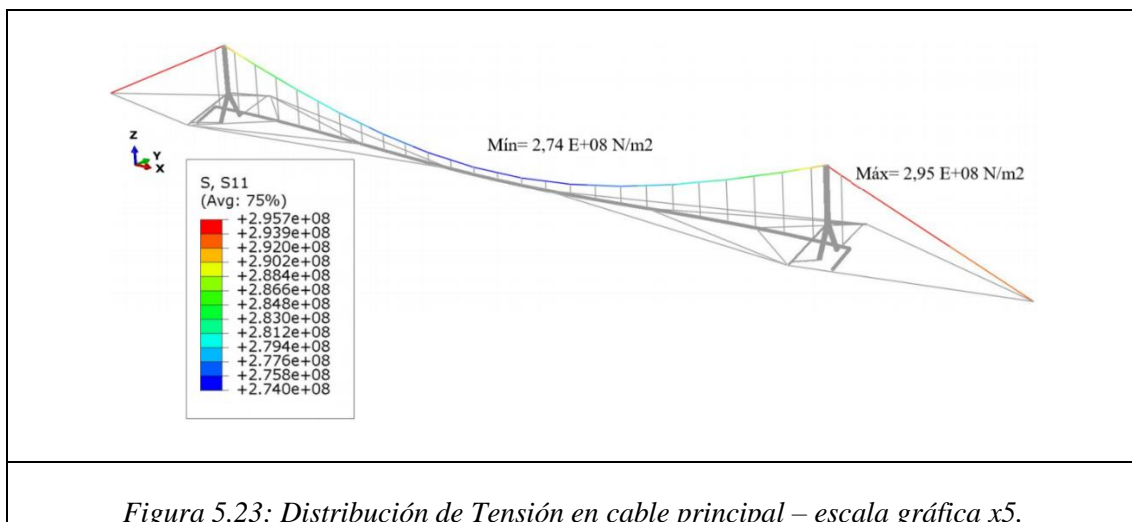


Figura 5.23: Distribución de Tensión en cable principal – escala gráfica x5.

Cable Principal	Fuerza Teórica	Tensión Teórica	Tensión malla (MEF)	diferencia en Tensión
Punto	[N]	[N/m2]	[N/m2]	[%]
Apoyo A	-	-	2,95E+08	-
1	482715	3,13E+08	2,91E+08	7%
2	480174	3,12E+08	2,87E+08	8%
3	478232	3,11E+08	2,85E+08	8%
4	476437	3,09E+08	2,83E+08	9%
5	474741	3,08E+08	2,82E+08	9%
6	473129	3,07E+08	2,80E+08	9%
7	471598	3,06E+08	2,79E+08	9%
8	470146	3,05E+08	2,77E+08	10%
9	468773	3,04E+08	2,77E+08	10%
10	467478	3,04E+08	2,76E+08	10%
11	466261	3,03E+08	2,75E+08	10%
12	465123	3,02E+08	2,74E+08	10%
Punto C-13	464064	3,01E+08	2,74E+08	10%
14	465123	3,02E+08	2,74E+08	10%
15	466261	3,03E+08	2,75E+08	10%
16	467478	3,04E+08	2,76E+08	10%
17	468773	3,04E+08	2,77E+08	10%
18	470146	3,05E+08	2,77E+08	10%
19	471598	3,06E+08	2,79E+08	9%
20	473129	3,07E+08	2,80E+08	9%
21	474741	3,08E+08	2,82E+08	9%
22	476437	3,09E+08	2,83E+08	9%
23	478232	3,11E+08	2,85E+08	8%
24	480174	3,12E+08	2,87E+08	8%
25	482715	3,13E+08	2,91E+08	7%
Apoyo B	-	-	2,95E+08	-

*Tabla 5.6: Comparación entre tensión teórica vs tensión modelada por la malla, en cable principal.*

Luego, en la tabla 5.7 se presenta la comparación de la tensión teórica y de ensayos promedio de péndolas vs el promedio de tensión reproducido por la malla de elementos. Similarmente al análisis antecesor se registra una diferencia del 9%. Nuevamente, esto significa un resultado muy favorable e indica que el modelo numérico reproduce consistentemente las tensiones actuales en péndolas.

Fuerza teórica promedio	Tensión teórica promedio	Tensión de malla promedio (MEF)	Diferencia
[N]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]	[%]
12282	1,05E+08	1,14E+08	9%

Tabla 5.7: Comparación entre el promedio de tensiones medidas en ensayos dinámicos vs el promedio de tensiones modelada por la malla, en péndolas.

Además de comparar y analizar los resultados de los valores de tensión hallados mediante las distintas metodologías, se verifican los valores de resistencia. La resistencia de trabajo de cada cable se indicó en apartado 4.2, y es la que se utilizará como límite superior en la comparación. En tabla 5.8 se indican la CST (carga segura de trabajo del Cable Principal y de Cable Secundario/péndola) y la Cm que representa la carga que registra la malla en las condiciones actuales de sollicitación. En ambos casos se verifica que la carga del modelo que se estima solicita las secciones de la malla es menor que la carga límite de trabajo del material. Lo cual es correcto y de esperar ya que como se mencionó en el Capítulo 1 la estructura no ha sufrido daños ni colapso.

$$CST [N] > Cm MEF [N]$$

CST-Cp (de tabla 4.1)	Cm-Cp (MEF)	CST-Cs (de tabla 4.2)	Cm-Cs (MEF)
[N]	[N]	[N]	[N]
480200	454300	35280	13383

Tabla 5.8: Verificación de resistencia en Cable principal y Cable secundario-péndolas.

## 5.10 CONCLUSIÓN.

El diseño del modelo de elementos finitos reproduce correctamente los valores de desplazamiento y tensión que registra actualmente la estructura.

Es importante destacar que las consideraciones especiales aplicadas durante la confección del modelo facilitaron en gran medida el resultado favorable de la simulación.

Se concluye que el MEF se encuentra calibrado y acondicionado para simular los efectos de la readecuación geométrica que se desarrolla en el próximo capítulo.

## **6 CAPÍTULO: MODELADO DE LA PROPUESTA DE READECUACIÓN GEOMÉTRICA.**

---

### **6.1 INTRODUCCIÓN.**

El presente Capítulo es la culminación del desarrollo de la propuesta sobre la que se funda el Proyecto Integrador Profesional. Con los antecedentes del Capítulo 2 se realizan la descripción de la estructura y el análisis geométrico del problema. Luego en el Capítulo 3 se indicaron en qué consiste y como se materializará la solución propuesta. Durante el desarrollo del Capítulo 4 se completaron los datos necesarios para la elaboración del modelo que simulará la propuesta, y se calculan las tensiones y desplazamientos teóricos que luego corroboran y calibran el modelo de elementos finitos. En el Capítulo 5 fueron descriptas las instancias de elaboración del modelo y el adecuado funcionamiento, de manera tal de reproducir correctamente el estado actual de tensiones y de desplazamientos de la estructura.

Finalmente, en el Capítulo 6 y con el modelo de elementos finitos calibrado se procede a simular la opción propuesta de acondicionamiento geométrico, registrando y analizando la respuesta de la estructura ante los estímulos que suponen las etapas de rectificación del ducto. Se presenta el modelado de la propuesta de ajuste geométrico y los resultados obtenidos. El objetivo del Capítulo es verificar la propuesta mediante el análisis de resistencia de los elementos y precisar los datos de la secuencia para una correcta y completa descripción de la propuesta de readecuación geométrica.

El secuenciamiento del ajuste geométrico que se presenta es el resultado de varias simulaciones e iteraciones, donde la selección de la opción que mejor se adecua a las variables en estudio pondera; verificación de tensiones límites en el ducto, medición y control de desplazamientos en el ducto y cables y facilidad de ejecución. En el Capítulo 3 se describió de qué manera y con qué dispositivos se materializará la corrección y también se indicó que la misma se ejecuta según una primera etapa de 15-5cm y luego sucesiones de 5cm, aquí se define la cantidad de pasos, el orden y sobre qué elementos estructurales operar.

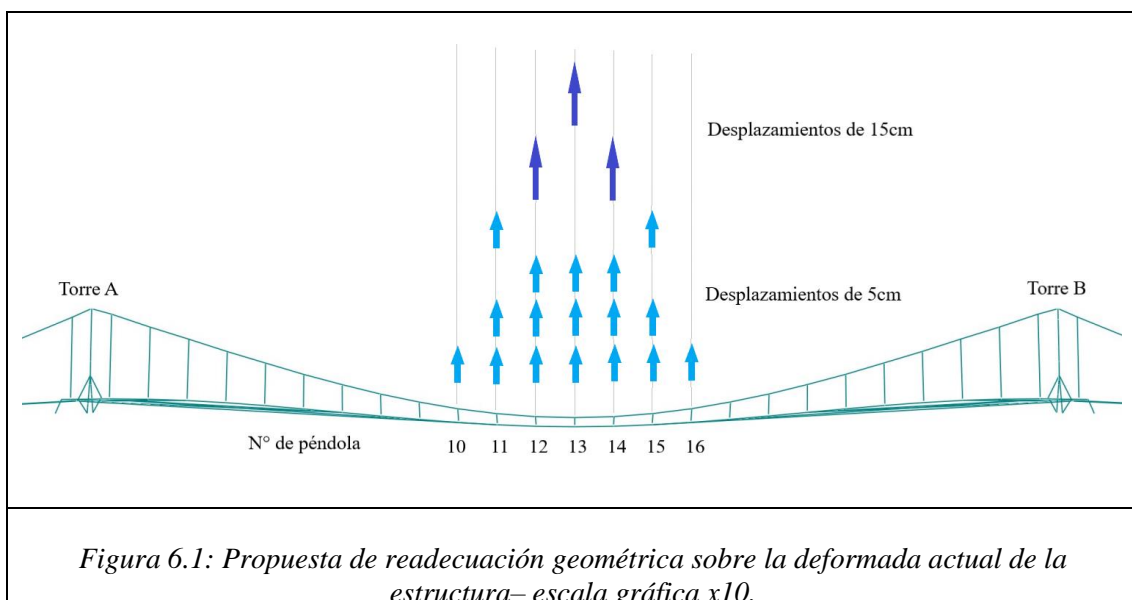
Inicialmente se indica la secuencia y variables a modelar, luego el resultado y parámetros a controlar, posteriormente se enlaza la secuencia a las etapas del Capítulo 3 y finalmente se concluye con el dimensionamiento de los nuevos accesorios a incorporar.

## 6.2 VARIABLE POR MODELAR.

El proceso de readecuar geoméricamente el eje del ducto implica un desplazamiento vertical ascendente de éste, producto de aplicar una fuerza directamente vinculada al descenso del cable principal mediante el retesado de las péndolas. En consideración de esto y a simple vista, se podría optar por aplicar en los nodos ó elementos fuerzas externas ó desplazamientos que simulen el proceso de rectificación.

De la revisión del manual de usuario del software [19] surgen como opciones factibles: aplicar desplazamientos o fuerzas sólo en nodos. Se prueban las dos opciones y debido a la disparidad en los resultados (la simulación considerando fuerzas no provee resultados consistentes) se define aplicar desplazamientos verticales en los nodos del cable principal y el ducto para simular correctamente la readecuación geométrica.

De esta manera y sobre el modelo calibrado del Capítulo 5 se incorporan los sucesivos estados de carga como desplazamientos inducidos en los nodos. Estos valores de desplazamiento representarán las etapas instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15 y 5cm (sección 3.3.1) y la secuencia de posicionamiento con pasos de 5cm (sección 3.3.2) retesado de péndolas. Abajo en la figura 6.1 se muestra la estructura en la condición actual y sobre ella se indican las seis etapas propuestas para la readecuación, detalladas a continuación en tabla 6.1.





Péndola	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Total
10						↑ 5cm	↑ 5 cm
11			↑ 5cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 15 cm
12		↑ 15cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
13	↑ 15cm			↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
14		↑ 15cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
15			↑ 5cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 15 cm
16						↑ 5cm	↑ 5 cm

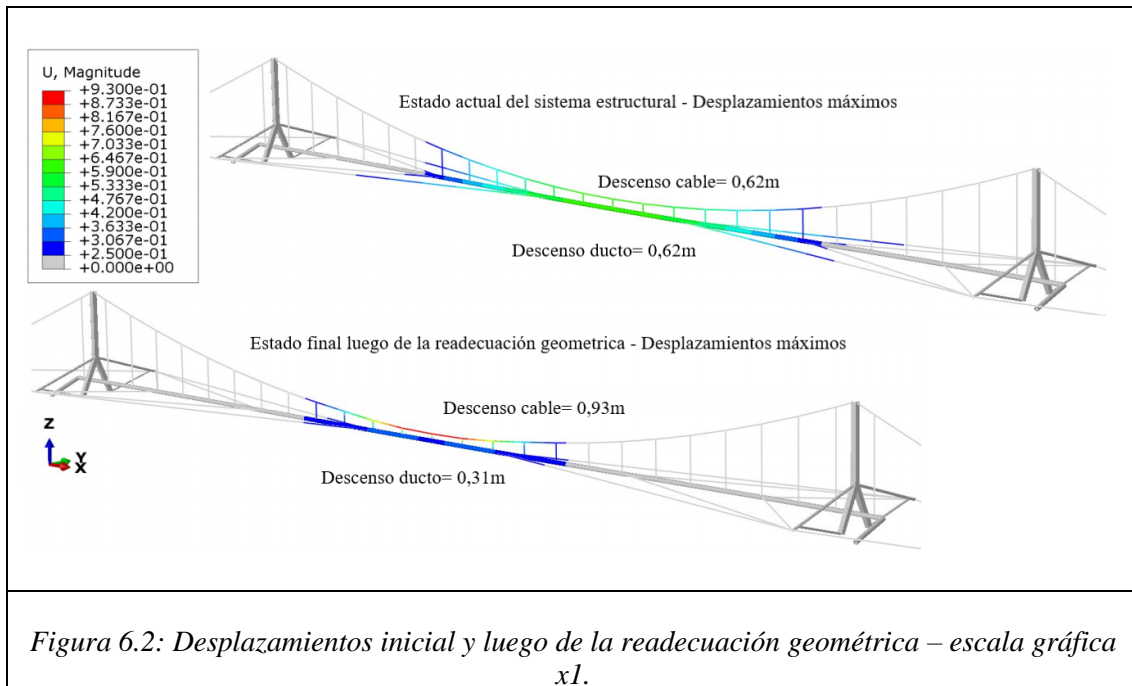
Tabla 6.1: Propuesta de readecuación geométrica.

### 6.3 RESULTADOS Y CONTROL DE PARÁMETROS.

En esta sección se muestran y analizan los resultados obtenidos de la simulación de las etapas indicadas en la figura 6.1 y especificadas en la tabla 6.1. Particularmente se indican los desplazamientos que se registran durante cada etapa y a continuación los esfuerzos y la verificación de solicitaciones correspondientes a cada elemento estructural.

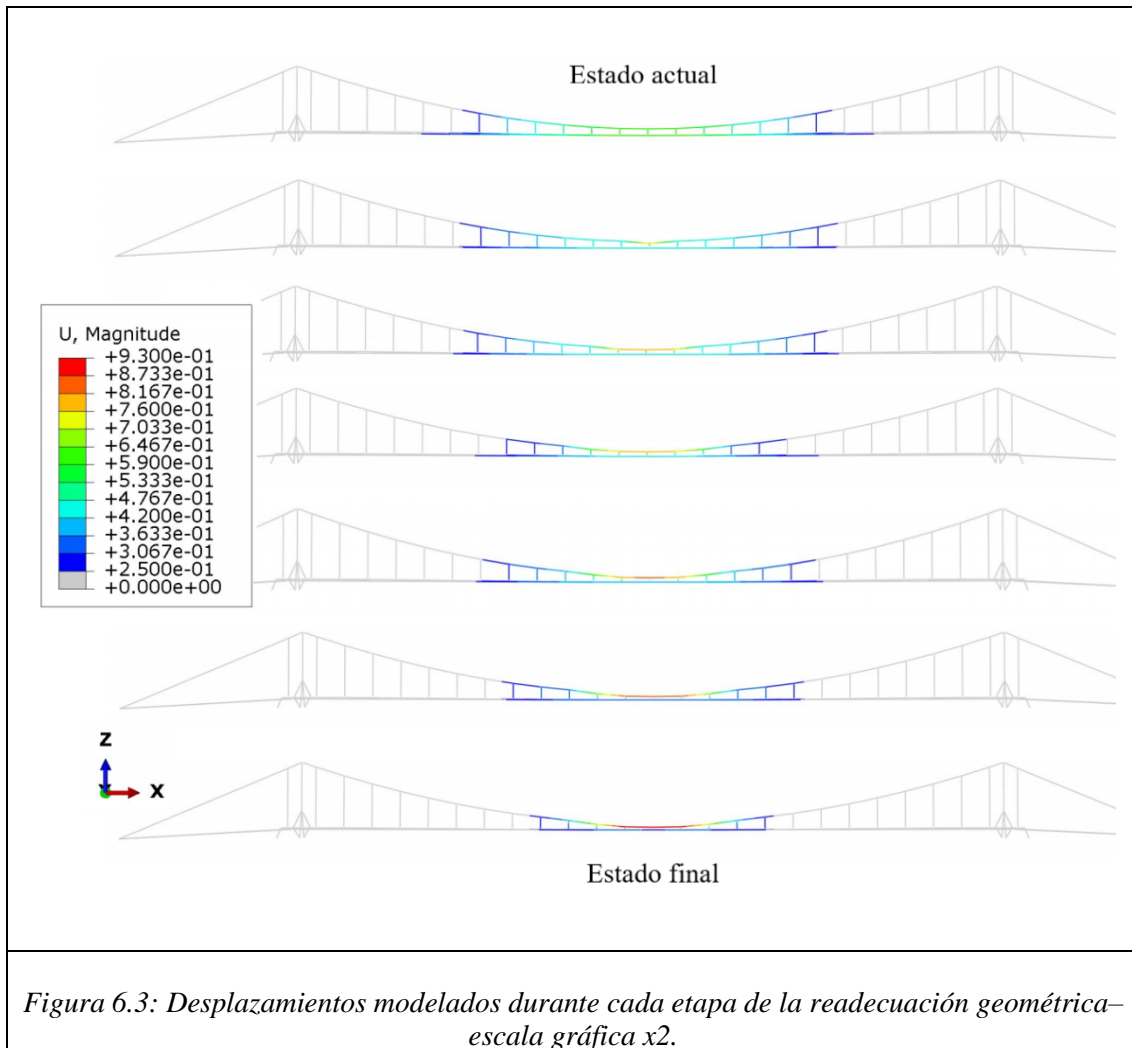
#### 6.3.1 Desplazamientos: estados inicial y final de la readecuación geométrica.

La figura 6.2 compara la malla en las condiciones actuales donde el ducto y el cable registran descensos de 62cm y la malla luego de la recomposición geométrica, donde se verifica que efectivamente el ducto se recompone 31cm respecto de la horizontal y el cable desciende aún más producto del retesado de las péndolas.



### 6.3.2 Desplazamientos resultantes en las etapas de readecuación geométrica.

En la figura 6.3 se presentan los resultados de todas las etapas (no sólo inicial y final) en una vista frontal. Se observa que con el avance del procedimiento el ducto asciende y el cable principal descende, ambos de manera controlada y en el centro de la estructura. El modelo reproduce correctamente los desplazamientos inducidos y los efectos de estos en la malla, la interacción Cable-Péndola-Ducto responde favorablemente en todas las etapas de la propuesta de readecuación geométrica.



Tal y como se mencionó en reiteradas oportunidades, el elemento foco del análisis es el ducto. Por este motivo, en la figura A6.4 (ver Anexos) se grafican sólo los desplazamientos del ducto durante cada etapa y se indica la posición del ducto en los planos, recordando que se considera nivel horizontal del eje del ducto (sin desplazamientos, posición de diseño) la cota  $z=6,488$  m, valor al cual tiende la propuesta

de readecuación. Del análisis de los resultados presentados en la figura A6.4 (ver Anexos) se concluyen las siguientes tres observaciones:

Los primeros desplazamientos se ejecutan con mayor amplitud de corrección (15cm) que los posteriores (5cm), esto se debe principalmente a que el movimiento del ducto debe acompañar la curvatura/deformada de la etapa anterior sin superarla, de manera tal de no elevar las solicitaciones en forma desmedida. Efecto que registra el modelo cuando el paso siguiente supera el desplazamiento de la curva respuesta del paso anterior.

La metodología de intervención propuesta y los valores de resistencia límites seleccionados dan como resultado una corrección de 0,31m del total (0,62m) registrado actualmente en la sección central del ducto.

Como es de esperar, el reacondicionamiento total y completo del ducto es complejo y requiere de otra metodología y dispositivos.

### 6.3.3 Tensiones resultantes en las etapas de readecuación geométrica.

Se calculan las solicitaciones que registran los elementos de la malla durante cada etapa de la simulación y se evalúan según los fundamentos de resistencia de materiales en la bibliografía [21]. Se analizan ducto, cable principal y péndolas. Se debe verificar que en ningún caso las solicitaciones provocadas por los desplazamientos impuestos superen los valores límites de resistencia de cada material, especificados en la sección 4.2. Asimismo, también se corrobora que los valores máximos registrados en cada etapa se mantengan en el orden de la etapa anterior, de manera tal de controlar también la distribución de los esfuerzos.

El esfuerzo máximo que solicita a los elementos estructurales en cada etapa se calcula según la ecuación de flexión compuesta simple, ec.6.1 que se detalla según la figura 6.5.

$$\sigma_{M\acute{a}x} \left[ \frac{N}{m^2} \right] = \frac{F_{M\acute{a}x}}{A} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \pm \frac{M_{M\acute{a}x}}{I} * z_{M\acute{a}x} \left[ \frac{Nm}{m^4} * m \right] \quad \text{[[ec. 6.1]]}$$

Donde:

$\sigma_{M\acute{a}x} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$  = Máxima combinación de esfuerzos que solicita la sección del elemento estructural analizado durante una etapa del proceso de readecuación geométrica. En N/m<sup>2</sup> = Pa.

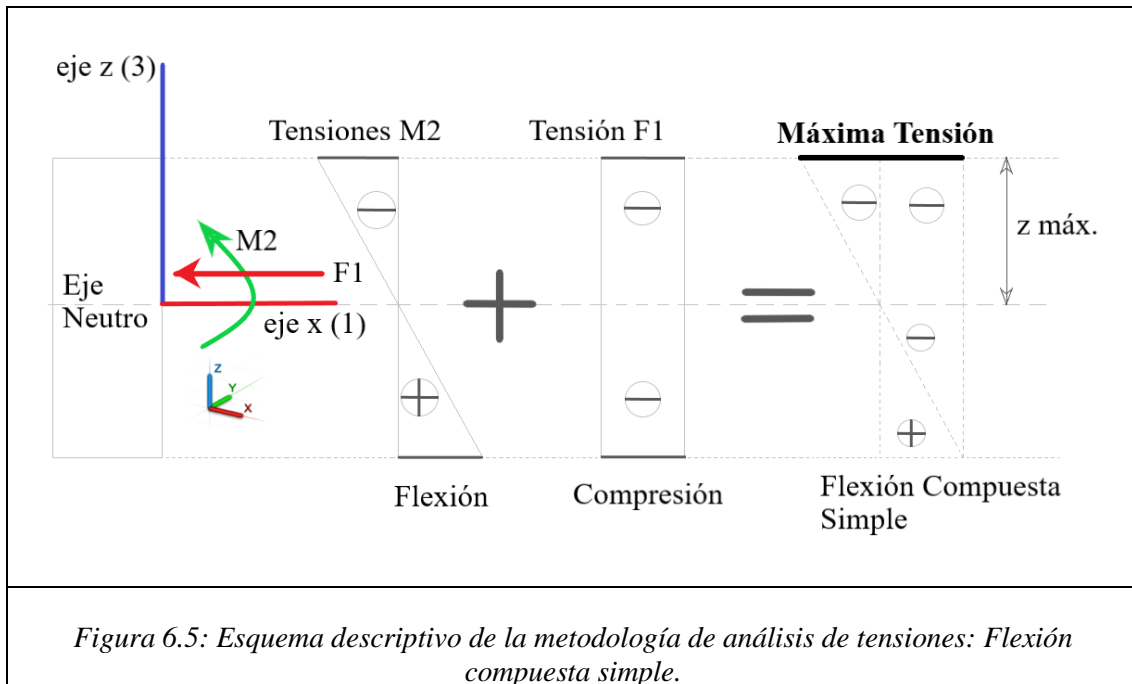
$F_{M\acute{a}x} [N]$  = Máxima fuerza normal al eje de la sección que solicita al elemento estructural analizado durante una etapa del proceso de readecuación geométrica. En N.

$A [m^2]$  = Área de la sección resistente al esfuerzo normal del elemento estructural analizado. En m<sup>2</sup>.

$M_{Máx}[N * m]$  = Máximo momento Flector que solicita la sección del elemento estructural analizado durante una etapa del proceso de readecuación geométrica. En  $N*m$ .

$I[m^4]$  = Momento de Inercia de la sección resistente a flexión del elemento estructural analizado. En  $m^4$ .

$z_{Máx}[m]$  = Distancia máxima desde el eje neutro de la sección resistente al momento flector al punto más alejado de ésta. En  $m$ .



*Figura 6.5: Esquema descriptivo de la metodología de análisis de tensiones: Flexión compuesta simple.*

La fórmula 6.1 se compone de dos términos, el primero se corresponde con tensión debido a cargas normales al eje del ducto y el segundo se corresponde con las tensiones debidas a sollicitaciones de momento flector. Abajo se indica el proceder del análisis y superposición en cables y ducto:

Para todos los cables, ya sean el principal o las péndolas, el análisis de tensión solo considera esfuerzos normales al eje y únicamente de tracción. Por lo tanto, la ec.6.1 para cables sólo cuenta con el primer término y en signo positivo. En el Software este valor se indica por S11 y es de valor positivo.

El ducto además de esfuerzos axiales de compresión o tracción puras también admite esfuerzos producto de la Flexión. Por lo tanto, el ducto incorpora los dos términos de la ecuación para el cálculo y la superposición de esfuerzos se realiza tal cual lo indicado en la figura 6.5. Es decir, la tensión de compresión o tracción máxima que solicita la sección se ubicara en la fibra extrema (para un valor de  $z$ =máximo que coincide con el radio del ducto), ya que el Eje Neutro de la sección coincide con el eje del elemento estructural.

Como se muestra en la figura 6.5 y para un momento M2, sobre el eje y, que comprime las fibras superiores y tracciona las fibras inferiores y un esfuerzo de Compresión pura aplicado sobre el eje x, resulta en una superposición de esfuerzos que es máxima en la fibra superior y mínima en la fibra inferior. Por lo tanto, la sollicitación máxima de la sección será la resultante de la superposición de esfuerzos que genere la condición más desfavorable para la fibra extrema. En el Software los momentos solicitantes se indican por SM1, SM2 y SM3 según sea el eje y con valor positivo o negativo según corresponda el giro y los esfuerzos axiales se indican por SF1 y de valor negativo para compresión y positivo para tracción.

Ducto:

Adaptando la ec.6.1 a la sección rígida del ducto y considerando la figura 6.6 donde se indican las secciones con el registro de los máximos esfuerzos, se obtiene la ec.6.2.

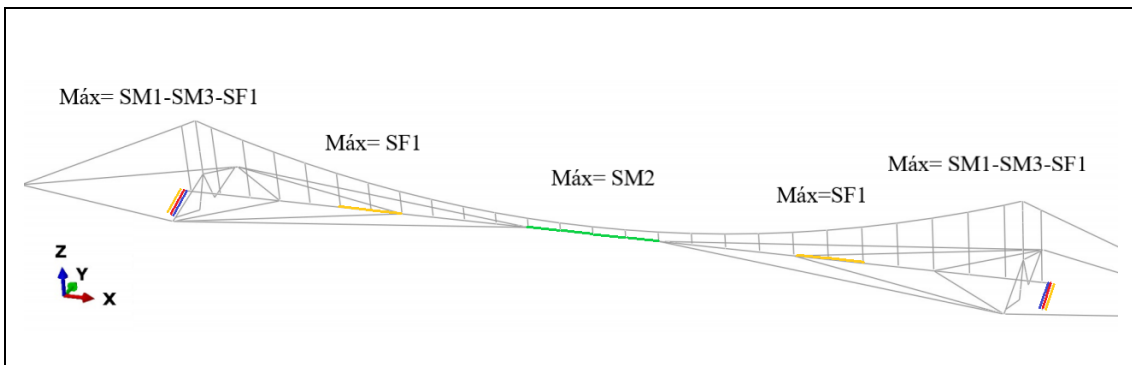


Figura 6.6: Ubicación y tipo de esfuerzos máximos en tramos del ducto.

$$\sigma_{Máx} \left[ \frac{N}{m^2} \right] = \frac{SF_1}{A_{ducto}} \left[ \frac{N}{m^2} \right] + \frac{SM_2}{I_{11}} * r \left[ \frac{Nm}{m^4} * m \right] \quad \text{[[ec. 6.2]]}$$

Se informa que del análisis de los resultados se verifica que en todos los casos la tensión máxima registrada en el ducto durante las simulaciones se origina en combinación de SF1 y SM2. Se calcula la sollicitación máxima y se compara con el valor de carga segura de trabajo (CDT-d) adoptada para el ducto, e indicada en 4.2.3. A continuación se resumen en la tabla 6.2 el análisis de sollicitaciones y resistencia del ducto para todo el proceso de readecuación.

En todos los casos se verifica que la carga segura de trabajo es mayor a la sollicitación máxima de la sección durante todas las etapas de la rectificación:

$$CST_D \left[ \frac{N}{m^2} \right] > \sigma_{m\acute{a}x} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

Análisis de solicitaciones y resistencia en el Ducto				
Etapa	Solicitación máxima del modelo ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	Ubicación	Carga Segura de Trabajo CST-D (tabla4.5)	Estado
[nombre]	[N/m2]	[elemento]	[N/m2]	[V/NV]
Actual	3,10E+07	32	1,15E+08	Verifica
Paso 1	2,30E+07	30 y 35	1,15E+08	Verifica
Paso 2	3,38E+07	31 y 33	1,15E+08	Verifica
Paso 3	9,13E+07	34 y 32	1,15E+08	Verifica
Paso 4	3,58E+07	34 y 32	1,15E+08	Verifica
Paso 5	3,58E+07	34 y 32	1,15E+08	Verifica
Paso 6	3,38E+07	31 y 33	1,15E+08	Verifica

Tabla 6.2: Verificación de solicitaciones en el ducto.

Como es de esperar los elementos con mayor solicitación son los elementos donde actualmente se registra el mayor desplazamiento y donde se induce la mayor corrección. A continuación, y en la figura 6.7 se muestra su ubicación: elementos 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

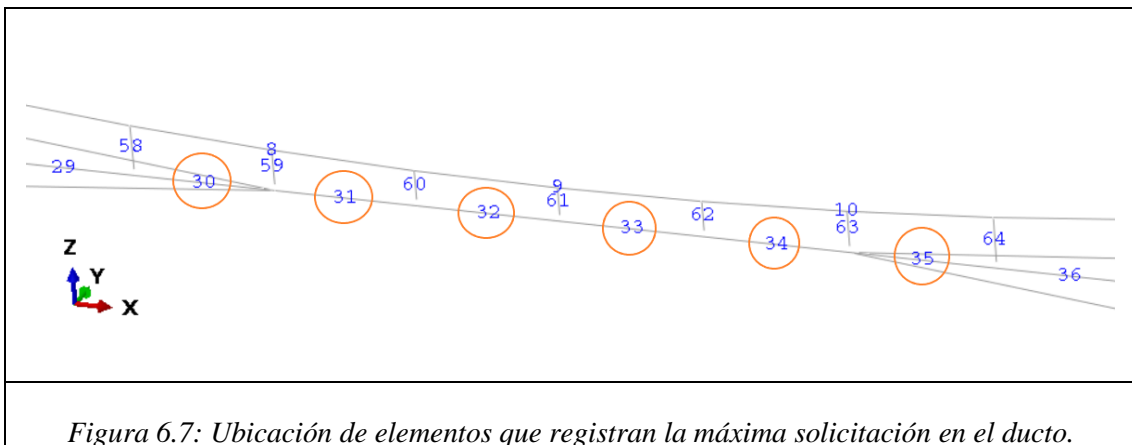


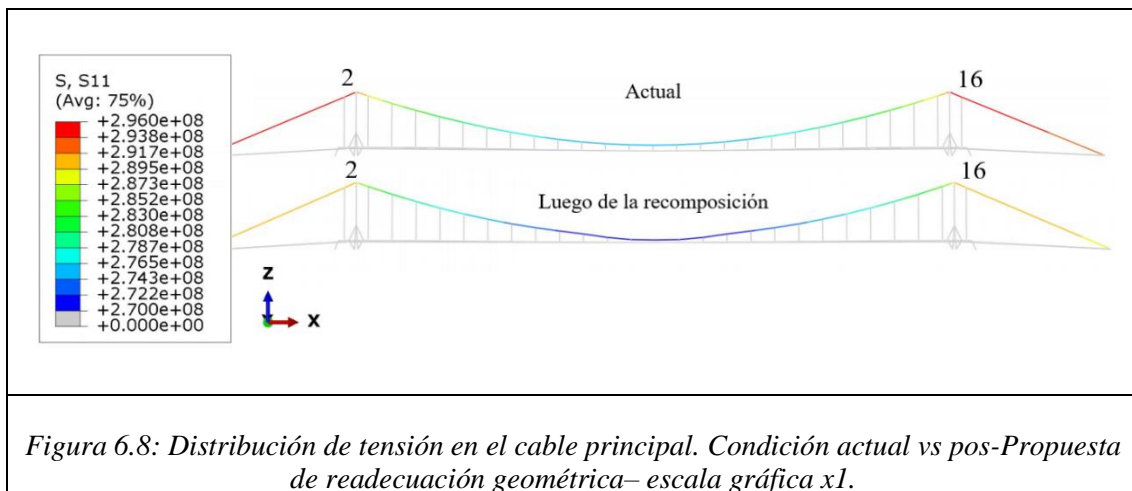
Figura 6.7: Ubicación de elementos que registran la máxima solicitación en el ducto.

Si bien el valor máximo de todo el proceso verifica correctamente, es importante mencionar que el ducto es muy sensible a movimientos que se desarrollen sin consideración de la curvatura existente. Es decir, un desplazamiento por más pequeño que sea, ejecutado sin considerar la curvatura del paso anterior eleva sensiblemente el esfuerzo SM2.

### Cable principal:

En cada etapa de la readecuación geométrica se analiza la distribución de tensiones S11 sobre el cable principal. La distribución de tensión en la etapa inicial y final es la indicada en la figura 6.8, allí se observa que los segmentos más solicitados se corresponden con las secciones que se encuentran próximas a las torres (elementos 2 y 16) y el valor disminuye hacia el centro como ya se explicó durante el desarrollo del modelo teórico de la sección 4.3.

Del análisis de esfuerzos en cada una de las etapas del proceso se concluye que el cable principal no incrementa el valor de la solicitación, contrariamente disminuye. Este efecto se debe principalmente a que la curva que describe el cable se deforma para impulsar el desplazamiento vertical del ducto, aplanándose. Y recordando la ec.4.16, donde una disminución de pendiente en el cable implica un aumento del factor  $\cos*\theta$ , consecuentemente esto disminuye el valor de la fuerza T que solicita la sección del cable. Adaptando la ec.6.1 a la sección del cable principal y considerando la figura 6.8 donde se indica la distribución de esfuerzos, se obtiene la ec.6.3.



$$\sigma_{11} \left[ \frac{N}{m^2} \right] * A_{cable} [m^2] = F_{m\acute{a}x} \quad \text{[[ec. 6.3]]}$$

Se reemplazan los valores para cada etapa, se calcula la máxima fuerza que solicita el cable y se compara con el valor de la carga segura de trabajo CST-cp. A continuación, y en la tabla 6.3 se detalla el análisis de solicitaciones y resistencia en el cable principal. Nuevamente, en todos los casos se verifica que la carga segura de trabajo es mayor a la solicitación máxima de la sección del cable durante todas las etapas de la readecuación:

$$CST_{CP} [N] > F_{M\acute{a}x} [N]$$

Análisis de solicitaciones y resistencia en el Cable principal				
Etapa	Solicitud máxima del modelo (F máx.)	Ubicación	Carga Segura de Trabajo CST-Cp (tabla4.1)	Estado
[nombre]	[nombre]	[elemento]	[N]	[V/NV]
Actual	455316	2 y 16	480200	Verifica
Paso 1	447200	2 y 16	480200	Verifica
Paso 2	452036	2 y 16	480200	Verifica
Paso 3	441872	2 y 16	480200	Verifica
Paso 4	452036	2 y 16	480200	Verifica
Paso 5	450296	2 y 16	480200	Verifica
Paso 6	448771	2 y 16	480200	Verifica

Tabla 6.3: Verificación de solicitaciones en el cable principal.

Cable secundario – péndolas:

Respecto de la distribución se observa que actualmente algunos cables se encuentran destensados y otros evidencian fenómeno de creep, se espera que luego de incorporar los tensores y efectuar las correcciones geométricas las péndolas estén solicitadas de manera uniforme.

Adaptando la ec.6.1 a la sección de las péndolas se obtiene la ec.6.4.

$$\sigma_{11} \left[ \frac{N}{m^2} \right] * A_{pendola} [m^2] = F_{m\acute{a}x} \quad \text{[[ec. 6.4]]}$$

Análisis de solicitaciones y resist. en el Cables secundarios/péndolas				
Etapa	Solicitud máxima del modelo (F máx.)	Ubicación	Carga Segura de Trabajo CST-Cs (tabla4.2)	Estado
[nombre]	[nombre]	[elemento]	[N]	[V/NV]
Actual	18737	-	35280	Verifica
Paso 1	18373	-	35280	Verifica
Paso 2	18590	-	35280	Verifica
Paso 3	18135	-	35280	Verifica
Paso 4	18590	-	35280	Verifica
Paso 5	18512	-	35280	Verifica
Paso 6	18444	-	35280	Verifica

Tabla 6.4: Verificación de solicitaciones en cables secundarios, péndolas.



Igual que para el cable principal, se reemplazan los valores para cada etapa, se calcula la máxima fuerza que solicita las péndolas y se compara con el valor de la carga segura de trabajo CST-cs. En la tabla 6.4 se detalla el análisis de solicitaciones y resistencia en las péndolas. Nuevamente, en todos los casos se verifica que la carga segura de trabajo es mayor a la solicitación máxima de la sección.

$$CST_{Cs} [N] > F_{Máx} [N]$$

#### 6.4 PRECISIÓN DE LA PROPUESTA DE READECUACIÓN GEOMÉTRICA

Una vez constatado que la solicitación máxima actuante en los elementos durante las distintas etapas es menor que la resistencia límite de los materiales, se procede a enlazar los pasos dentro de las dos modalidades según las cuales se readecua el ducto y a continuación dimensionar los accesorios necesarios para ejecutar la propuesta.

##### 6.4.1 Vinculación de los pasos con las etapas del retesado de péndolas.

En el Capítulo 3 se indicó que la readecuación del ducto se materializará en dos etapas distintas: instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15 y 5cm y a continuación secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm. En la tabla 6.5 se agrupan los seis pasos en las dos etapas, de manera tal de unificar la propuesta y seguido se describe la nomenclatura.

Péndola	IT1-15cm	IT2-15cm	IT3-5cm	RP1-5cm	RP2-5cm	RP3-5cm	Total
10						↑ 5cm	↑ 5 cm
11			↑ 5cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 15 cm
12		↑ 15cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
13	↑ 15cm			↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
14		↑ 15cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 30 cm
15			↑ 5cm		↑ 5cm	↑ 5cm	↑ 15 cm
16						↑ 5cm	↑ 5 cm

*Tabla 6.5: Secuencia de pasos en readecuación geométrica unificada con las etapas del retesado de péndolas.*

-IT: Desplazamientos inducidos durante la Incorporación del elemento Tensor. Como se indicó en Capítulo 3, son desplazamientos que se realizan mediante el eslingado provisorio del ducto, previo a la incorporación del tensor. Esta tarea que se prevé realizar en todas las péndolas comienza en las centrales 11, 12, 13, 14, y 15.

-RP: Desplazamientos inducidos durante el Retesado de péndolas, ejecutados luego de la instalación del elemento tensor. El reajuste se efectúa mediante el accionamiento de los tensores ubicados en cada péndola.

#### 6.4.2 Dimensionamiento de los accesorios.

La propuesta se completa con el dimensionamiento de los accesorios provisorios y los permanentes a incorporar para la correcta ejecución del reajuste.

##### 6.4.2.1 Accesorios permanentes: Tensores.

La instalación de tensores implica la incorporación permanente de un accesorio/dispositivo metálico entre el ducto y la péndola (que los vincula). El análisis dimensional y de resistencia será el mismo que el aplicado en las péndolas.

La carga segura de trabajo del tensor (CST-t) se selecciona en un rango coincidente con la carga segura de trabajo de péndolas (CST-cs). Es decir, si la CST-cs es 35280 N (3,6 Tn), de acuerdo con ese valor y según el estándar [22] y fabricante [4] se selecciona el diámetro nominal de rosca exterior inmediatamente superior que verifique la CST: se corresponde con 1 ¼". Abajo, en tabla 6.6 se indican la Carga Segura de Trabajo del elemento tensor y la Carga Mínima de Rotura, que igual que con los cables, los fabricantes y la normativa indica un factor de seguridad igual a 5.

Diámetro de rosca exterior	CMR-t	CST-t
[pulg]	[lbf]	[lbf]
1 1/4	60000	12000
-	[N]	[N]
-	267000	53000
-	[Tn]	[Tn]
-	27	5,4

Tabla 6.6: Dimensionamiento del tensor - rosca 1 ¼". Factor de Seguridad=5. -De [22]-.

Los valores indicados en la tabla 6.6 son válidos para tensores del tipo quijada-quijada, ojo-ojo y combinación de éstos. Se informa que la resistencia adoptada incluye los distintos procesos de fabricación, de optar por la opción forjado se incrementa la resistencia (proceso que le confiere mayor resistencia al tensor).

Una vez designado el diámetro exterior resta seleccionar la longitud. Tal y como es de suponer la longitud de los tensores es distinta según la ubicación que tengan en la catenaria; los centrales serán de mayor longitud y disminuyendo hacia extremos. Para ese

valor de diámetro de rosca se confeccionan tres longitudes posibles; 12” 18” y 24”. En la figura 6.9 se muestra una vista donde se detalla el tensor y las longitudes posibles se indican por la dimensión BB presentada en el gráfico.

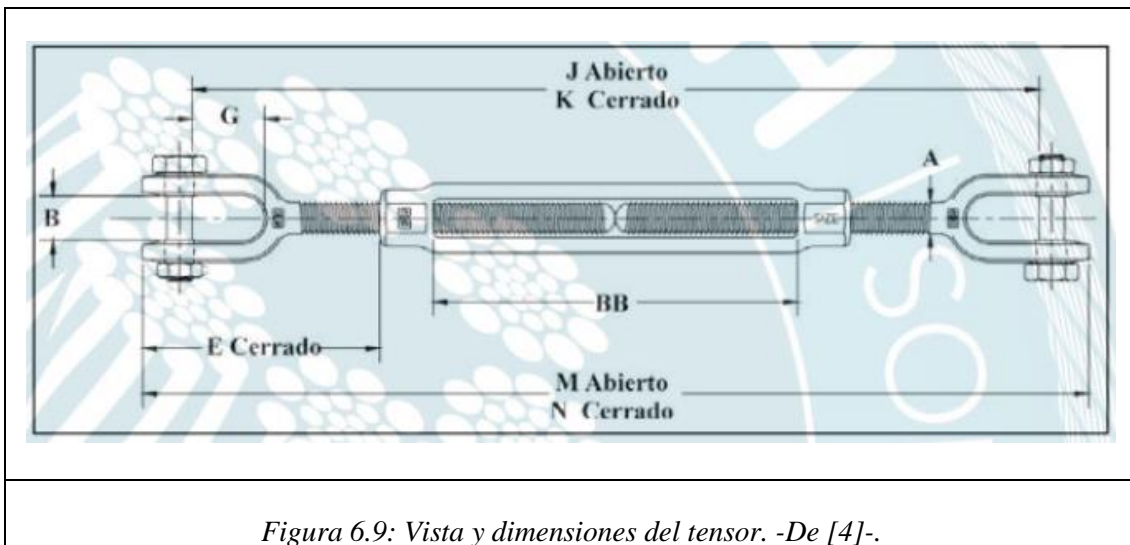


Figura 6.9: Vista y dimensiones del tensor. -De [4]-.

Considerando las longitudes presentadas en la tabla 6.5 y las opciones de largo disponibles se adopta la longitud del tensor a incluir en cada péndola. Se resumen en la tabla 6.7 y además se indica la longitud útil del tensor luego de la readecuación en caso de que la compañía que opera la línea considere un programa preventivo y correctivo de mantenimiento.

Péndola	Longitud	Longitud BB	Longitud
Numero	Readecuación Geométrica	Tensor	Útil para mantenimiento
1 a 9 y 17 a 25	Ajustes	8" (20cm)	20cm
10,16	↑ 5 cm	8" (20cm)	15cm
11,15	↑ 10 cm	12" (30cm)	20cm
12,13,14	↑ 15 cm	12" (30cm)	15cm

Tabla 6.7: Longitud de tensores de diámetro 1 ¼” para cada péndola.

#### 6.4.2.2 Accesorios secundarios: equipo criquet tensor.

El equipo criquet tensor compuesto por eslingas y dispositivo de ajuste se prevé utilizar únicamente para la instalación de los tensores metálicos. Las eslingas estarán sometidas al mismo esfuerzo que las péndolas, por lo tanto, para su dimensionamiento se parte de la carga segura de trabajo de péndolas CST-cs, 35280 N (3,6 Tn). Los fabricantes [5] recomiendan utilizar un factor de seguridad FS=3. De [5] Se selecciona el equipo con cinta de 100mm de ancho para sujeción pesada y con carga nominal 10 Tn. Se indica que

todos los componentes del equipo criquet tensor deberán seleccionarse con resistencia nominal 10 Tn. A continuación, en la tabla 6.8 se especifican los parámetros del equipo criquet tensor.

Ancho de cinta	CMR-eqt	CST-eqt
[mm]	[Tn]	[Tn]
100	10	3,6

*Tabla 6.8: Dimensionamiento del equipo criquet tensor; resistencia nominal 10tn. Factor de Seguridad=3. -De [5]-.*

## **6.5 CONCLUSIÓN**

Durante el desarrollo de las secciones del Capítulo: se simularon y evaluaron las distintas etapas del procedimiento de readecuación geométrica, se verificó que los esfuerzos solicitantes en los elementos estructurales en ningún caso superen la resistencia de la sección y se dimensionaron los accesorios a incluir para la ejecución de la propuesta.

De lo anterior se concluye que el procedimiento propuesto es factible y no sitúa la estructura ni sus elementos bajo ningún estado de riesgo estructural.

La metodología de ejecución propuesta para la rectificación del ducto y su modelado estiman ejecutar en seis pasos una recuperación de 31cm, de los 62cm que registra actualmente el ducto, a expensas de incrementar el descenso del cable.

## 7 CAPÍTULO: CÁLCULO Y COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS Y MODOS DE VIBRACIÓN.

---

### 7.1 INTRODUCCIÓN

Sobre la malla de elementos finitos y según las condiciones; estado actual y estado final luego de aplicada la propuesta de readecuación geométrica se calculan los parámetros dinámicos de la estructura: primeros valores de frecuencia natural y sus modos de vibración. Se comparan entre sí y se efectúa un análisis complementario de la readecuación.

El cálculo de los modos de vibración proporciona las posibles formas a adoptar en caso de una excitación dinámica. Ej: viento (es la mayor). Si la estructura incrementa su rigidez, entonces más energía es necesaria para excitar los modos. Ese incremento de rigidez indirectamente se evaluará comparando el valor de la frecuencia asociada a cada modo antes de ejecutar la readecuación geométrica y luego del acondicionamiento.

Tal y como se mencionó en el Capítulo 1 no se considerará un análisis de cargas dinámicas tipo viento o sismo actuado sobre la estructura, el objetivo del Capítulo es únicamente calcular los modos de vibración y la frecuencia asociada a esos modos, comparar los valores e indirectamente inferir sobre el proceso de readecuación.

### 7.2 CÁLCULO DE FRECUENCIAS DE LA ESTRUCTURA EN SU CONDICIÓN ACTUAL Y POS READECUACIÓN GEOMÉTRICA.

En la tabla 7.1 se indican los resultados del cálculo de frecuencia correspondientes con los primeros cuatro modos de vibración. Se verifica un aumento de frecuencia en los modos 2, 3 y 4 luego de ejecutada la readecuación geométrica en la estructura.

	Frecuencia natural	
	Actual	Pos RG
	[ciclo/tiempo]	[ciclo/tiempo]
Modo 1	0,104	0,104
Modo 2	0,162	0,287
Modo 3	0,282	0,369
Modo 4	0,287	0,558

*Tabla 7.1: Frecuencias de los cuatro primeros modos de la estructura; en condición actual y luego del proceso de readecuación geométrica.*

### **7.3 MODOS DE VIBRACIÓN DE LA ESTRUCTURA PREVIO A LA EJECUCIÓN DE LA READECUACIÓN GEOMÉTRICA.**

En la figura A7.1 (ver Anexos) se presentan los cuatro primeros modos de la estructura, calculados en la condición actual. El ducto es el elemento que registra mayor respuesta ante una excitación dinámica, con movimientos ondulares en los ejes z e y.

### **7.4 MODOS DE VIBRACIÓN DE LA ESTRUCTURA LUEGO DE LA READECUACIÓN GEOMÉTRICA.**

En la figura A7.2 (ver Anexos) se presentan los cuatro primeros modos de la estructura, calculados luego de ejecutada la propuesta de readecuación geométrica. Tal y como en el caso anterior el ducto es el elemento que registra mayor respuesta ante una excitación dinámica, con movimientos ondulares en los ejes z e y. Se destaca la siguiente observación: la frecuencia del modo 4 para la estructura reacondicionada es el doble la frecuencia del modo 4 para la estructura en la condición actual, motivo por el cual el modo que se registra es del tipo torsional, en ejes y-z.

### **7.5 CONCLUSIÓN.**

De los valores en la tabla 7.1 y las figuras A7.1 y A7.2 (ver Anexos) se concluye que el sistema estructural registra un aumento de su rigidez al reacondicionarse geoméricamente. Las frecuencias de los modos luego de la readecuación son mayores y consecuencia de esto es la excitación de un modo torsional donde para el caso previo a la readecuación el modo no es del tipo torsional.

## 8 CAPÍTULO: CONCLUSIONES.

---

### 8.1 CONCLUSIÓN

Se concluye en que el objetivo principal del trabajo fue alcanzado; se diseñó el modelo de elementos finitos que simuló correctamente la propuesta de readecuación geométrica de la estructura metálica. La metodología de ejecución y su modelado estiman una recuperación de 31cm, de los 62cm que registra actualmente el ducto. Durante el desarrollo de los siete Capítulos que conforman el proyecto integrador profesional se han efectuado satisfactoriamente las distintas tareas que contribuyeron al objetivo principal. En el Capítulo 2, se presentó, describió, analizo y caracterizo toda la información con la cual comenzó el desarrollo del trabajo; planos, mediciones y ensayos.

En el Capítulo 3, se describió la ejecución de la propuesta según dos etapas: instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15-5cm y secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm. Donde se indica que la corrección del desplazamiento se efectúa, inicialmente mediante el equipo criquet tensor y a continuación con el retesado de las péndolas.

En el Capítulo 4 se completó la información requerida para la correcta caracterización de los elementos estructurales, incorporando secciones, resistencias, Modulo de Young y densidad. Aquí se definió el valor de tensión admisible del ducto/unión soldada. Luego, por medio del modelo teórico de un cable colgante se calcularon esfuerzos y posición de equilibrio, necesarias para calibrar el modelo de elementos finitos.

En el Capítulo 5 se presentó el diseño del modelo de elementos finitos y se expuso que este reproduce correctamente los valores de desplazamiento y tensión que registra actualmente la estructura. Por lo tanto, se consideró calibrado y acondicionado para simular el proceso de readecuación.

En el Capítulo 6 se simulo y evaluó las distintas etapas del procedimiento de readecuación geométrica, verificando que los esfuerzos que solicitan los elementos estructurales en ningún caso superen la resistencia de la sección. También se dimensionaron los accesorios a incluir para la ejecución de la propuesta.

Finalmente, en el Capítulo 7, de la evaluación de los modos y frecuencias de vibración se infirió en que el reacondicionamiento geométrico de la estructura incrementa la rigidez de esta. Efecto favorable para un sistema tan flexible.

A continuación, en la figura 8.1 se comparten dos imágenes de la estructura durante la construcción, extraídas del registro fotográfico de Google earth [23].



## 8.2 ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS.

El alcance del trabajo necesariamente deja por fuera ciertos análisis que podrían realizarse continuando con línea de desarrollo. Considerando que a la fecha la estructura registra más de treinta y cinco años de servicio y previendo que se estima siga operando muchos años más, sería prudente realizar los siguientes estudios que complementen y perfeccionen la propuesta:

Evaluación dinámica de la estructura. Análisis de ciclos de carga térmica y sus efectos en la estructura. Análisis de carga de viento, vórtices y sus efectos sobre la estructura.

Evaluación de integridad de la estructura. Ejecución de Ensayos No Destructivos (END) que permitan evaluar el estado de fenómenos como corrosión.

El presente trabajo se basa en el registro de mediciones de posición y fuerzas efectuadas en el año 2014. En caso de efectuar una evaluación integral del sistema estructural se recomienda que estos valores se actualicen a la fecha.

## 8.3 OPTIMIZACIÓN DE LA PROPUESTA.

La propuesta se compone de un procedimiento de readecuación geométrica y de un modelo de elementos finitos que modela los efectos de ejecutar ese acondicionamiento. A continuación, se presentan algunas opciones de mejora en ambos:



### MEF:

Además de utilizar el elemento viga (beam), el ducto se modeló con elementos de cascara (shell). Los resultados fueron similares a los obtenidos con elementos de viga, pero la integración total de la malla no pudo efectuarse, es decir, solo se logró modelar únicamente el ducto.

Confeccionar la malla fue un trabajo laborioso, en aquel momento no se logró resolver la incompatibilidad y lograr el acople gráfico entre el Software de elementos finitos y el software de dibujo asistido. Por lo tanto, el ingreso de la malla al software de elementos finitos se realizó por texto y no por gráfico, motivo por el cual muchos de los esfuerzos no se visualizan gráficamente, sino que se extraen en una tabla de datos.

Ingresar gráficamente la malla e incorporar elementos shell ha de ser una buena opción para la visualización de todos los esfuerzos en la interfaz gráfica.

### Procedimiento:

Respecto de la propuesta de readecuación geométrica, se sugiere retomar contacto con la compañía que opera la línea y desarrollar en conjunto un procedimiento de ejecución que cumpla los requisitos técnicos y de seguridad. En caso de concretarse la ejecución del reajuste geométrico, se recomienda realizar un estudio de evaluación, cuantificación y mitigación de riesgos. El estudio debe efectuarse en colaboración de todas las partes interesadas y afectadas a la tarea.

Una vez ejecutado el reajuste geométrico se recomienda la revisión de dicho procedimiento y la confección del correspondiente con el mantenimiento preventivo, incluyendo además de la corrección de desplazamientos la integridad de la sección.

Respecto de los accesorios y metodología de ejecución, se podría realizar un análisis más preciso de los elementos tensores (durabilidad), evaluar si efectivamente la instalación en todas las péndolas es la mejor opción. También es importante considerar que comercialmente la máxima longitud del equipo criquet tensor es de entre 9m y 12m, con lo cual sobre las péndolas extremas (más altas) quizá no se pueda ejecutar la instalación de tensores de la manera propuesta. La sección de accesorios y metodologías de ejecución es la más viable de optimizar.

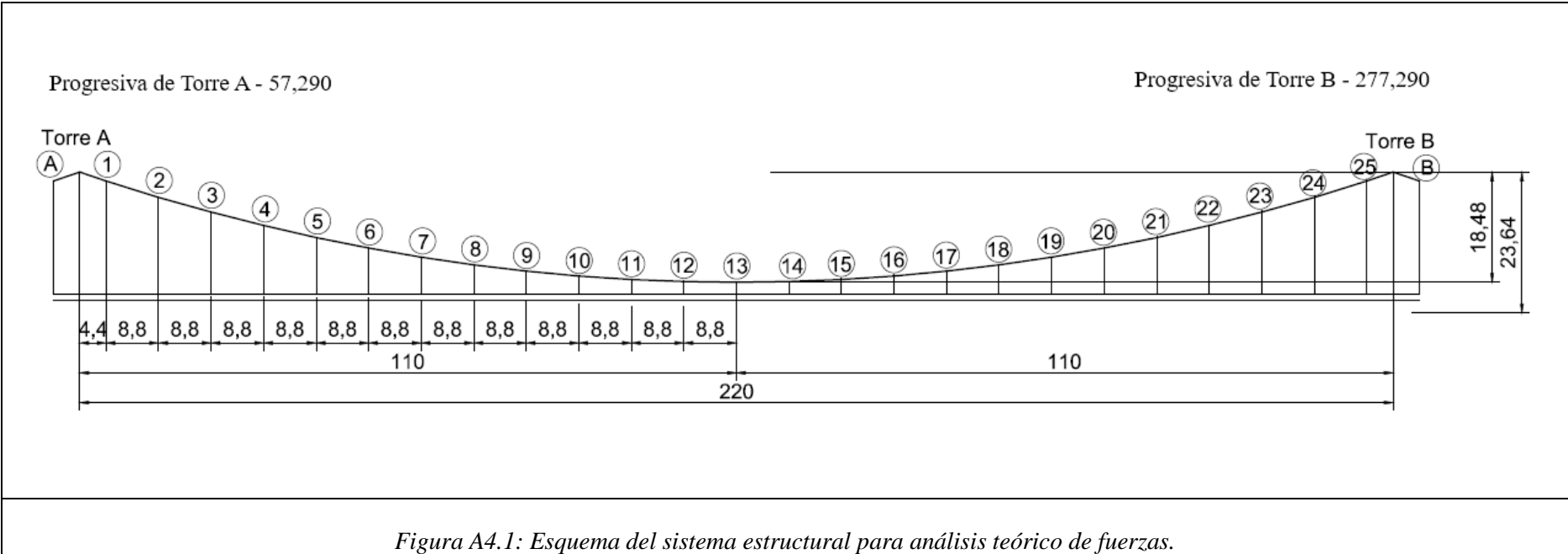
## BIBLIOGRAFÍA.

---

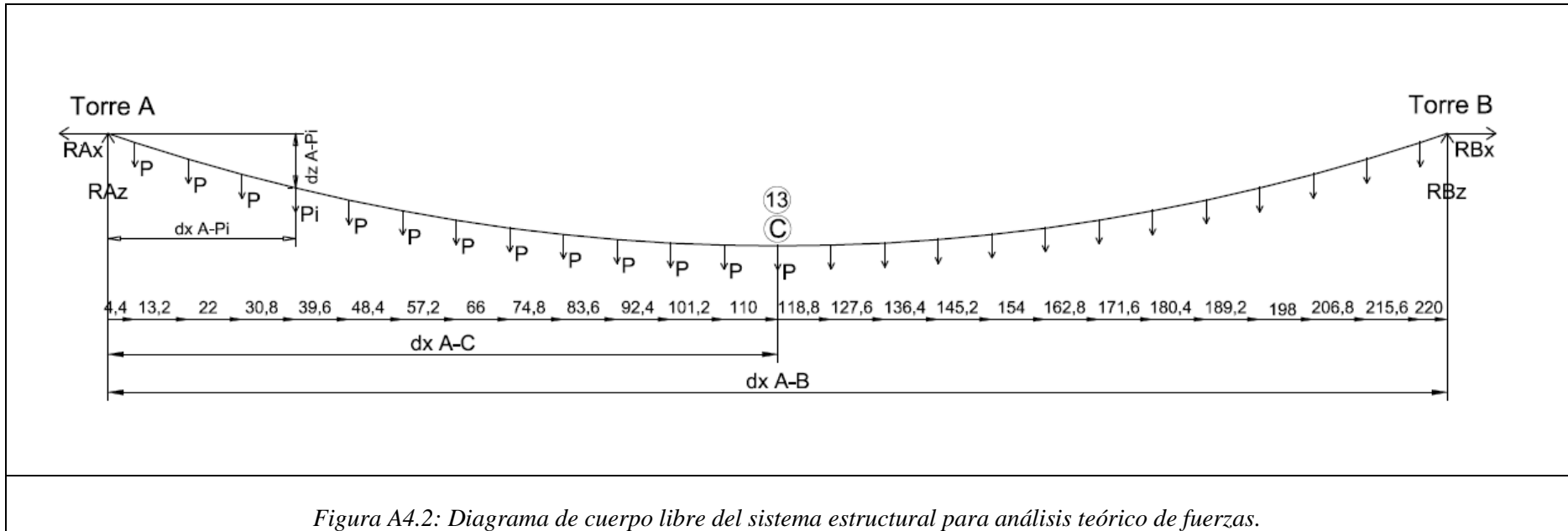
- [1] Ampuero Alata, E.J. (2012). *Consideraciones Estructurales en el Análisis y Diseño de Puentes Colgantes*. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- [2] *Servicio de Estudio de Condición y Propuesta para Catenaria en suspensión del Gasoducto de 24”*. Neuquén, Argentina: Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- [3] [www.thecrosbygroup.com/catalog](http://www.thecrosbygroup.com/catalog)
- [4] IPH SAICF (2012). Guía de consulta para izaje general: cables de acero, eslingas y accesorios. [www.iph.com.ar](http://www.iph.com.ar)
- [5] Delta Plus (2020). Catálogo Argentina. <https://fliphtml5.com/wqlnv/qdvs/basic/151-200>
- [6] Zegarra Ciquero, L. y Dr. Marcial Blondet (2007). *Análisis y Diseño de Puentes Colgantes*. Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Graduados.
- [7] Bridon: North American Catalog. [www.bridon.com](http://www.bridon.com)
- [8] Bridon (2008). High-quality Steel wire ropes for Surface mining applications. Structural Strands & Sockets. [www.bridon.com](http://www.bridon.com)
- [9] IPH SAICF (2011). Cables de acero para uso general. [www.iph.com.ar](http://www.iph.com.ar)
- [10] ASTM (2004). *A 586-04a: Standard Specification for Zinc-Coated Parallel and Helical Steel Wire Structural Strand*.
- [11] ASTM (2003). *A 603-98 (Reapproved 2003): Standard Specification for Zinc-Coated Steel Structural Wire Rope*.
- [12] ASME (2003). *B31.8\_2003: Gas Transmission and Distribution piping systems*.
- [13] NAG (1993). *Normas Argentinas Mínimas de Seguridad para el Transporte y Distribución de Gas Natural y otros Gases por Cañería*.
- [14] ASTM (2012). *A-53: Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*.
- [15] AWS (2010). *D1.1/D1.1M: Structural Welding Code*.

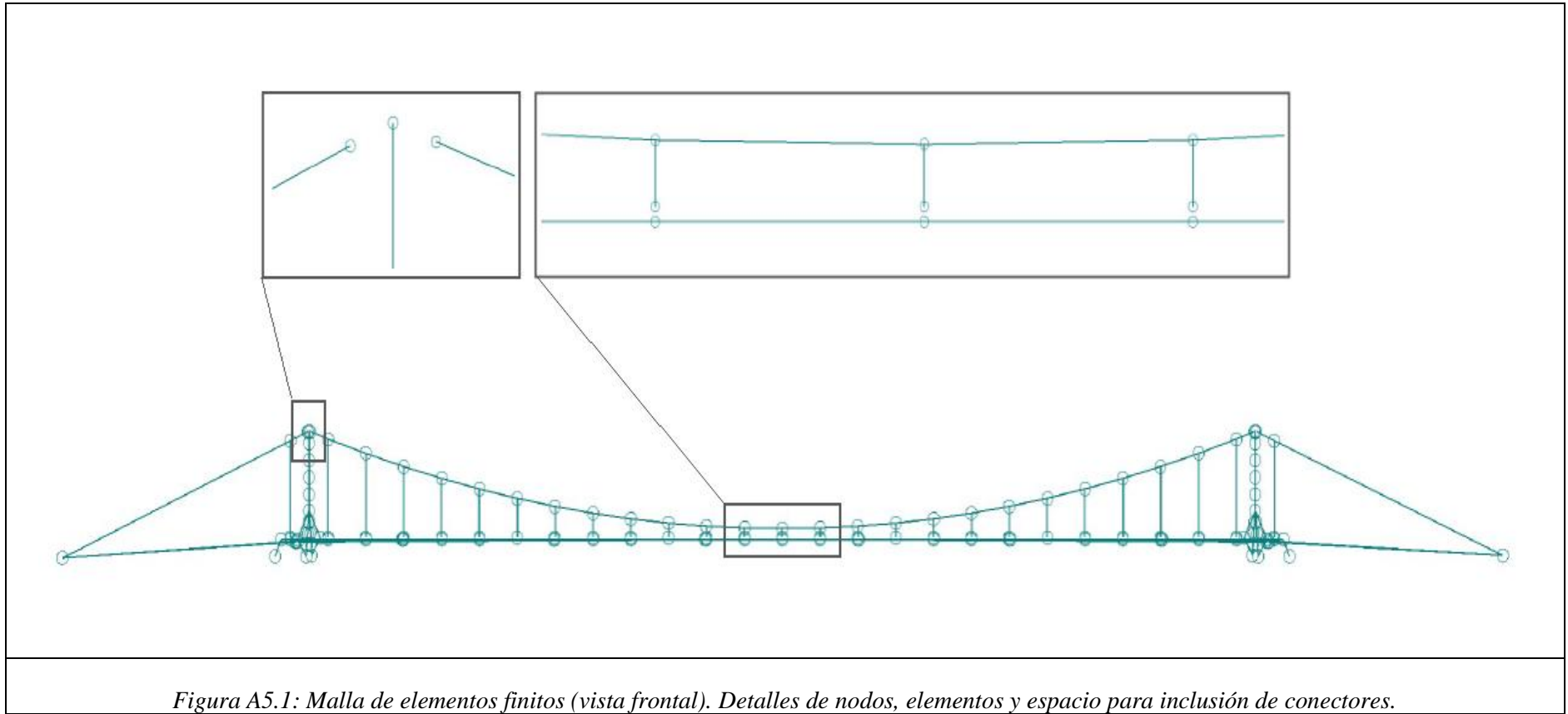
- [16] Beer F., Johnston E., Eisenberg E. (2005). *Mecánica vectorial para ingenieros: estática*. D.F, México: Editorial Mc Graw Hill.
- [17] Griffin, D. *Catenaries, Parabolas and Suspension Bridges*.  
<https://vdocuments.mx/mathscatenaries-parabolas-and-suspension-bridges.html>
- [18] Oñate Eugenio. (1992). *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos: análisis estático lineal*. Barcelona, España.
- [19] Simulia online. *Abaqus 6.12. Analysis User's Manual*.  
<http://dsk-016-1.fsid.cvut.cz:2080/v6.12/books/usb/default.htm?startat=pt01ch01s03aus03.html>
- [20] Uzcategui Flores, M. *Abaqus Programa de elementos finitos*. Mérida, Venezuela. Universidad de Los Andes, Centro Nacional de Calculo Científico.
- [21] Gere M. James. (2006). *Timoshenko: Resistencia de materiales*. Madrid, España: Editorial Thomson.
- [22] ASTM (1992). *F-1145/92: Standard Specification for Turnbuckles, Swaged, Welded, Forged*.
- [23] Google earth.

**ANEXOS.**

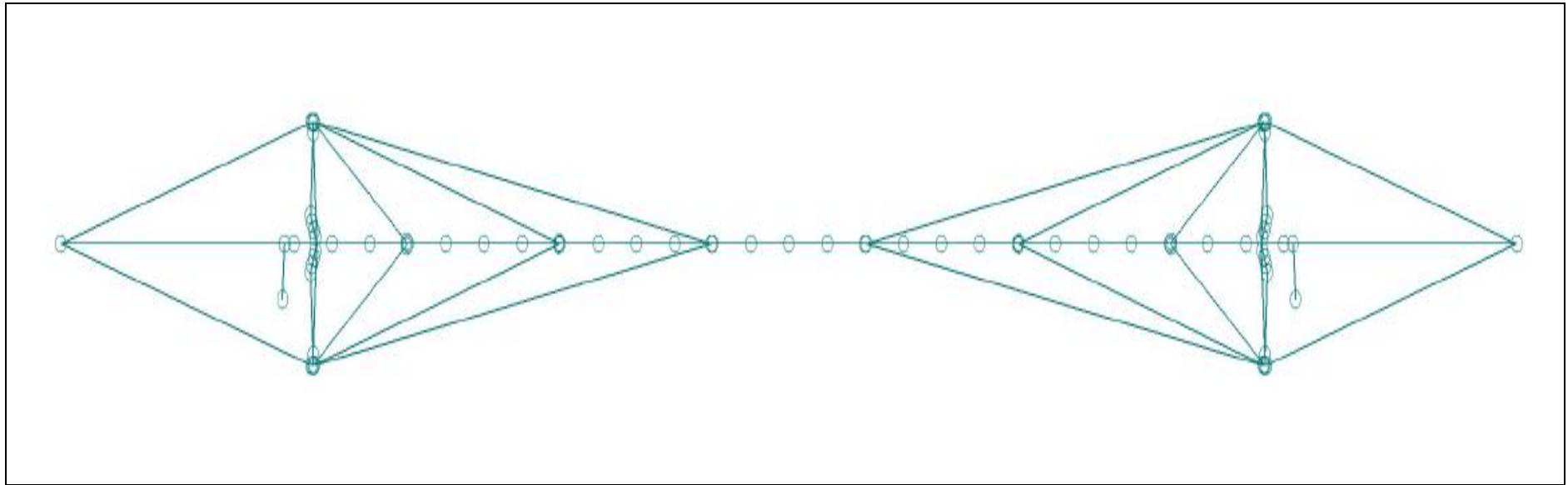


*Figura A4.1: Esquema del sistema estructural para análisis teórico de fuerzas.*

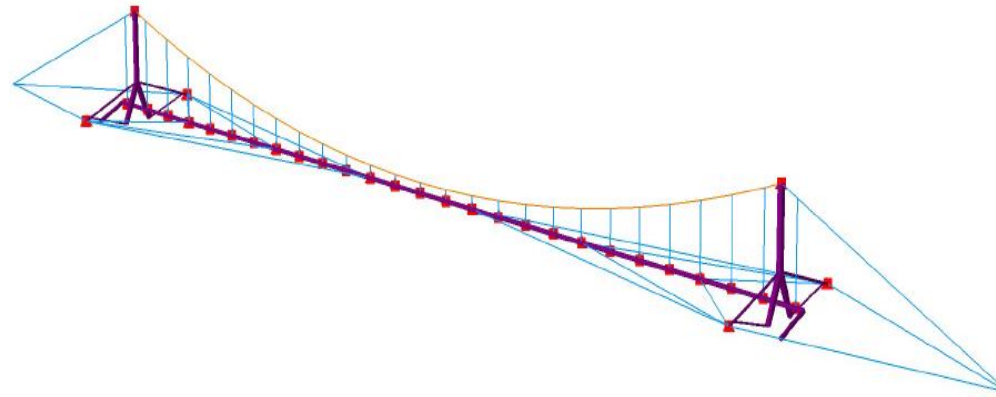




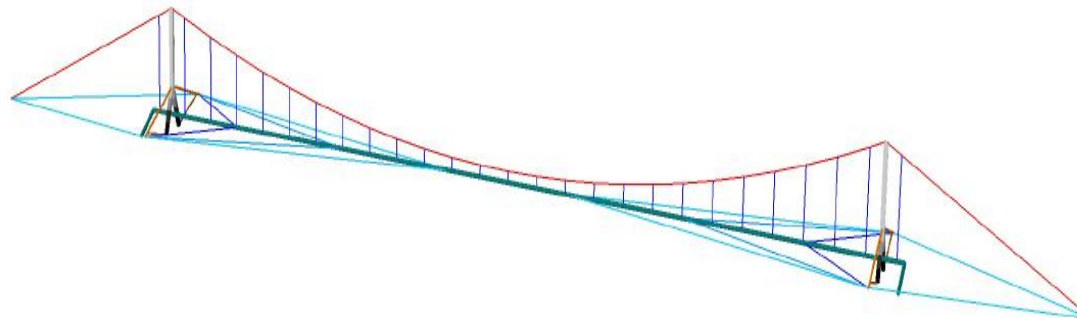
*Figura A5.1: Malla de elementos finitos (vista frontal). Detalles de nodos, elementos y espacio para inclusión de conectores.*



*Figura A5.2: Malla de elementos finitos (vista superior). Nodos y elementos.*

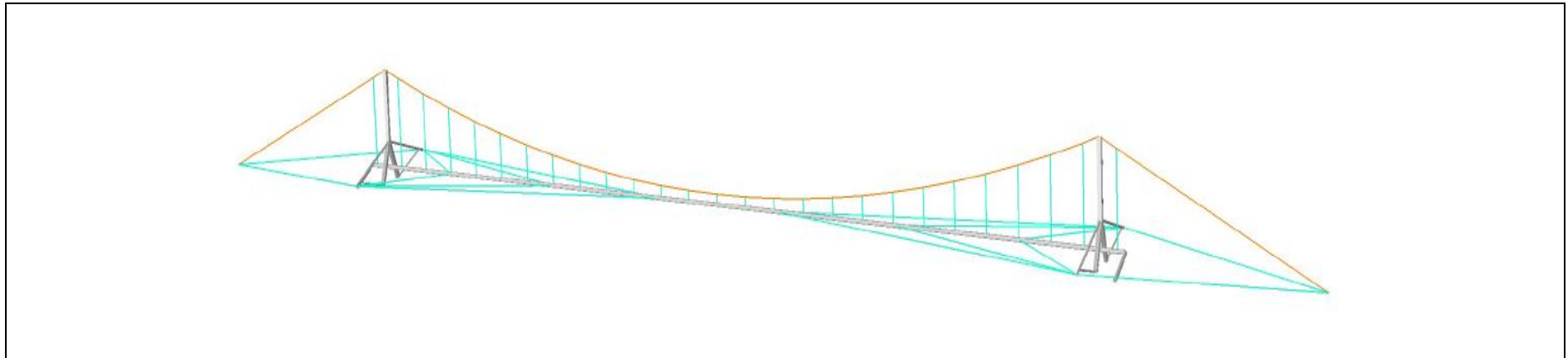


*Figura A5.4: Distintos tipos de elementos que componen el modelo; barras de 2 nodos, barras de 3 nodos, vigas y conectores.*

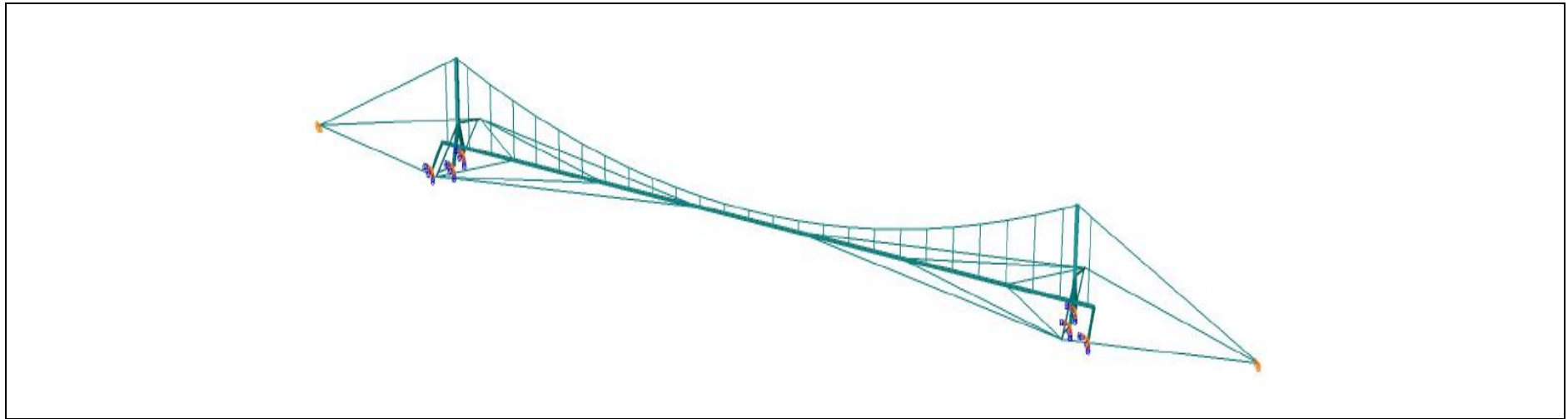


*Figura A5.10: Distintas secciones que componen el modelo.*





*Figura A5.12: Distintos materiales que componen el modelo; acero estructural, acero del torón y acero de péndolas.*



*Figura A5.14: Condiciones de borde del modelo; apoyos fijos en anclajes y empotramientos en torres y ducto.*

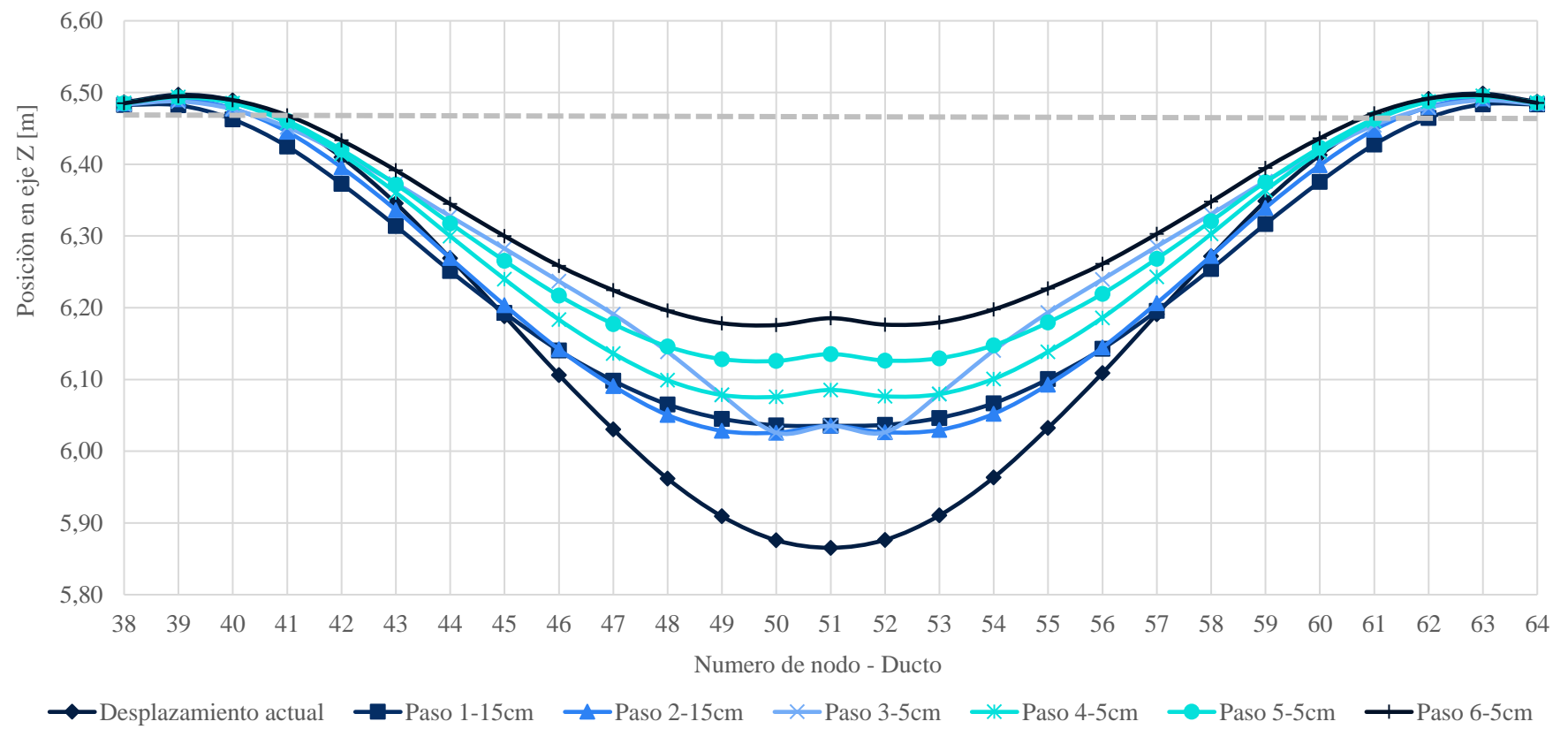


Figura A6.4: Desplazamientos que registra el modelo en cada etapa de la readecuación geométrica.  $Z=6,488m$  es la posición de diseño, en planos.

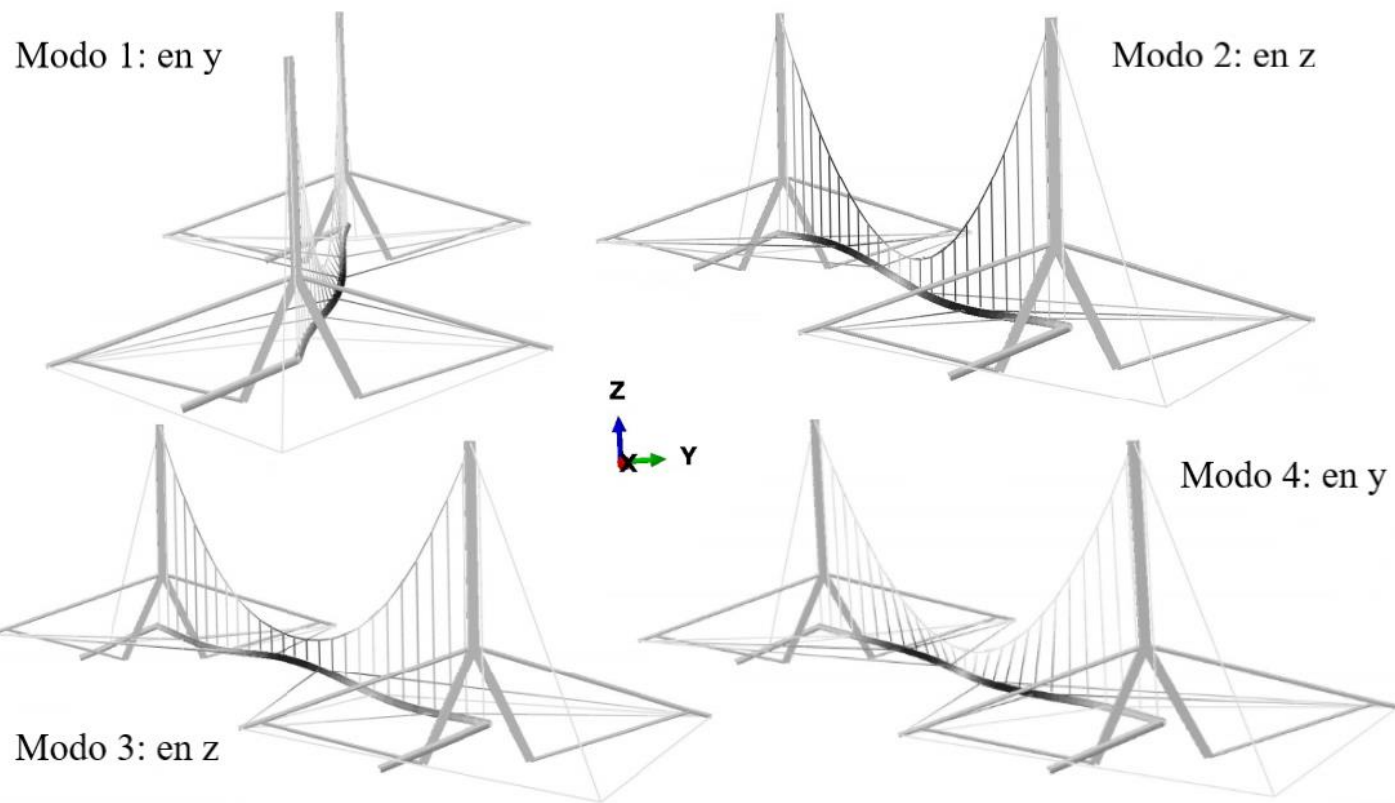
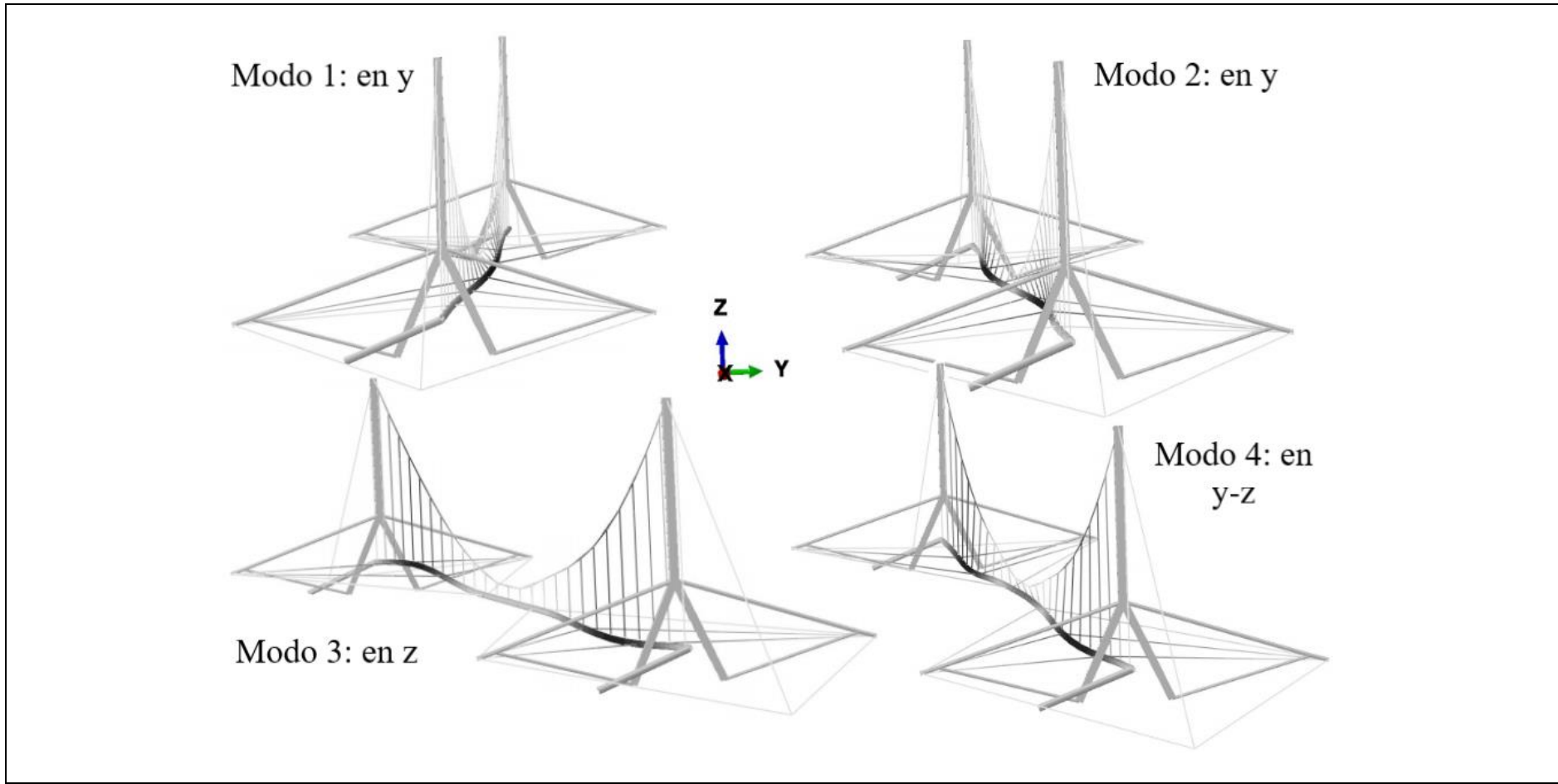


Figura A7.1: Cuatro primeros modos de vibración de la estructura previo al reacondicionamiento geométrico. – escala gráfica x100



*Figura A7.2: Cuatro primeros modos de vibración de la estructura luego de reacondicionamiento geométrico. – escala gráfica x100*